

Diseño de voladuras de contorno en túneles

Yoandro Diéguez-García
José Otaño-Noguel
Gilberto Sargentón-Romero

Resumen

Se realiza el diseño de la voladura de contorno en el tramo II del túnel Levisa-Mayarí del Trasvase Este–Oeste, a través de una novedosa metodología que considera las propiedades de las sustancias explosivas y la acción de estas sobre el macizo de rocas. En el cálculo se considera el desacople de las cargas de cordón detonante en los barrenos de contorno y las cargas compactas de Senatel Magnafrac™ para el grupo de barrenos de cuele y arranque. Los resultados después de la voladura permitieron disminuir la sobreexcavación en el túnel y obtener un área de la sección transversal de laboreo cercana a la exigida por proyecto, lo que significa para la empresa un ahorro considerable de tiempo y recursos.

Palabras clave: Voladura de contorno; diseño de voladuras; explosión en túneles; sustancia explosiva; cordón detonante.

Contour blasting design for tunnel excavations

Abstract

The contour blasting design for section II of the Levisa-Mayarí tunnel in the East-West transfer route was developed by implementing a novel methodology, which is based on the properties of explosive substances and their effects on a rocky massif. The calculation was completed considering decoupling the detonating cord loads in the contour drill holes and the Senatel Magnafrac™ compact loads for the group of cut and stringline holes. The results were: a reduction of excess excavations in the tunnel and obtaining a cross section close to the mining area required for the project with associated significant savings of time and resources.

Keywords: Contour blasting; blasting design; explosion in tunnels; explosive substance; detonating cord.

1. INTRODUCCIÓN

La ejecución de túneles y galerías es un caso de especial interés dentro de la técnica de voladuras, si se tiene en cuenta el papel preponderante que tienen los trabajos mineros y el desarrollo adquirido por los programas de construcción subterránea. Las investigaciones de los últimos años han revelado la existencia de un gran número de problemas no resueltos y la posibilidad de encontrar métodos de trabajo más rápidos, eficaces y baratos (Langerfors & Kihlstrom 1968).

El arranque de las rocas durante el laboreo de túneles con el empleo de la perforación y voladura se realiza a través de cálculos que permiten diseñar patrones de ubicación de las cargas en los frentes de estas excavaciones subterráneas.

Cuando se distribuyen los barrenos y se calculan los parámetros de la explosión para el laboreo de excavaciones por la forma convencional, por lo general, no se obtiene con precisión el contorno proyectado de la excavación, produciéndose desviaciones hacia el interior de la misma y del macizo, lo que implica un aumento del trabajo y del tiempo para la recogida de la roca y su trasportación, además de que aumenta el gasto de materiales y el costo para el relleno de la fortificación. Los contornos, al ser más irregulares, dificultan el trabajo de colocación del sostenimiento y las excavaciones sin sostenimiento provocan una gran resistencia aerodinámica (Otaño 1998).

Con el objetivo de obtener el contorno de la excavación con la mayor precisión posible y disminuir las violaciones a la estructura del macizo se han elaborado diferentes métodos que se agrupan bajo el nombre de explosión lisa o de contorno.

En la voladura de contorno, una carga que llena completamente un barreno crea, durante la detonación del explosivo y en la proximidad de la carga, una zona en la que la resistencia dinámica a compresión es ampliamente superada y la roca triturada y pulverizada. Fuera de esa zona de transición, los esfuerzos de tracción asociados a la onda de compresión generan un esquema de grietas radiales alrededor de todo el barreno. Posteriormente, la extensión de las grietas se produce bajo la acción de cuña de los gases de explosión que las invaden y se infiltran en ellas. La propagación preferencial en el plano axial, junto con el efecto de apertura por la presión de los gases, permiten obtener un plano de fractura de acuerdo con el corte diseñado. Puede pues, concluirse que el mecanismo de una voladura de contorno comprende dos fenómenos distintos, uno derivado de la onda de tensión y el otro de la acción de los

gases de la explosión, pero que entre ambos guardan un nexo causal (López–Jimeno et al. 1988).

En el Manual de EXSA y en el resto de las bibliografías consultadas se aborda la temática bajo el mismo principio planteado anteriormente. De manera que, si bien se describe científicamente el proceso de la voladura de contorno en túneles, aún no existe una metodología de cálculo que considere en su totalidad las características de las rocas y la acción de la explosión sobre estas.

En Cuba se han desarrollado investigaciones de gran importancia en el tema de la voladura subterránea. Por ejemplo, Sargenton (2007, 2008) establece criterios para la proyección de voladuras en obras subterráneas, argumentados en la esencia física de la acción de la explosión, pero que no tienen en cuenta todos los parámetros que intervienen en el diseño de la voladura de contorno.

En el presente artículo se realiza el cálculo y diseño de una voladura de contorno en el tramo II del túnel Levisa–Mayarí del Trasvase Este–Oeste, con una metodología que considera por primera vez las características de las rocas y de la sustancia explosiva, lo cual permitió reducir la sobrexcautación y aumentar la estabilidad de la obra subterránea.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del túnel

El túnel Levisa–Mayarí se encuentra ubicado en el municipio Mayarí, provincia de Holguín, la zona pertenece al grupo montañoso Nipe–Cristal–Baracoa, se caracteriza por un relieve montañoso, con cotas que van desde 20,1 m a 477,5 m. Las pendientes oscilan desde 0,002° hasta 64,45°, con un valor medio de 23,3°.

La investigación se realizó a los 560 m del tramo II del túnel. En la Figura 1 se presenta un perfil ingeniero–geológico que comprende 250 m de la excavación.

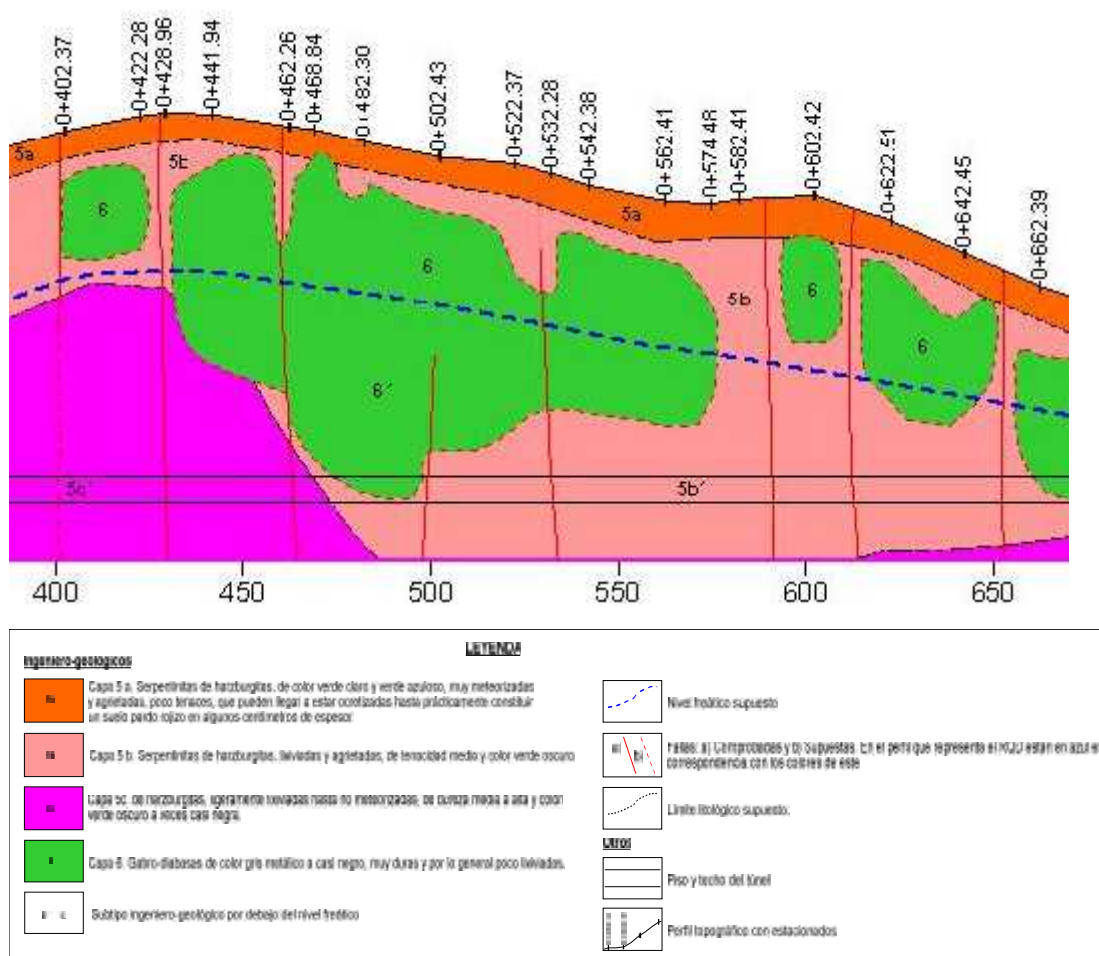


Figura 1. Perfil ingeniero-geológico del tramo II del túnel Levisa-Mayarí.

2.2 Características de las rocas y las sustancias explosivas empleadas

La litología presente en el frente del túnel es la serpentina de hazburgitas agrietadas; las propiedades físico-mecánicas de estas rocas se muestran en la Tabla 1.

Como sustancias explosivas (SE) se utilizaron el Senatel Magnafrac™, para la carga de los barrenos de cuele y arranque, y el cordón detonante para el contorno; las características técnicas de estas se exponen en la Tabla 2 (ULAEX S. A. 1998).

Tabla 1. Propiedades físico–mecánicas de las rocas

Características	U/M	Valor
Densidad de las rocas (ρ)	kg/m ³	2 160
Masa volumétrica (ρ)	kg/m ³	1 940
Resistencia a compresión simple estática [σ_c^e]	MPa	54,12
Resistencia a tracción estática [σ_t^e]	MPa	2,10
Módulo de elasticidad (E)	MPa	1209,43
Coefficiente de Poisson (μ)	--	0,25
Velocidad de las ondas elásticas longitudinales (VI)	m/s	2 473
Límite de resistencia a compresión dinámica de las rocas (σ_t^d)	MPa	870,79
Límite de resistencia a tracción dinámica de las rocas (σ_t^d)	MPa	5,88
Límite de resistencia a cortante dinámico de las rocas (σ_t^d)	MPa	86,32

Tabla 2. Características técnicas de las sustancias explosivas empleadas

Características	U/M	Senatel Magnafrac™	Cordón Detonante Cordtex™
Diámetro (d_{se})	mm	32	8,10
Longitud de cartucho (l_c)	mm	500	...
Densidad (ρ_{se})	g/cm ³	1,11	1,62
Masa de SE (m)	g	455 g/cartucho	42 g/m
Velocidad de detonación (Vd)	m/s	5 000	6 500
Calor de explosión, Q	(kcal/kg)	740	740
Índice de la adiábata de los productos de la explosión, K	...	3,12	3,35

2.3 Diseño de voladuras

Son muchas las técnicas de voladura de contorno que se han desarrollado a lo largo de los años, los métodos más difundidos son las voladuras de precorte y recorte.

La voladura de contorno de recorte consiste en la explosión de una sola fila de barrenos con cargas desacopladas. Esta técnica implica el arranque hacia un frente libre por lo que el espaciamiento de las cargas es mayor y resulta un menor coste (López–Jimeno et al. 1988).

El precorte se usa principalmente en minería a cielo abierto y obras públicas, en minería de interior su aplicación es muy rara, prácticamente limitada a la perforación de pozos verticales (Montoro & Lampaya 2010).

El uso de la voladura de contorno de precorte en el laboreo de excavaciones subterráneas horizontales se ve limitada esencialmente por los gastos que produce, razón por la cual no será abordada en la presente investigación. Cuando se haga referencia a la voladura de contorno, se estará abordando la explosión de recorte.

El cálculo para el diseño de las voladuras de contorno en el tramo del túnel objeto de la investigación se realizó a partir de determinar el campo tenso-deformacional producido al explotar las cargas de sustancia explosiva.

En el artículo Campo tenso-deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles (Diéguez-García et al. 2013) se describe de manera detallada el modelo matemático a seguir para la explosión de cargas de cordón detonante con espacio anular de aire, con lo cual se determina el radio de trituración (R_t), agrietamiento (R_g) y descostramiento (R_d).

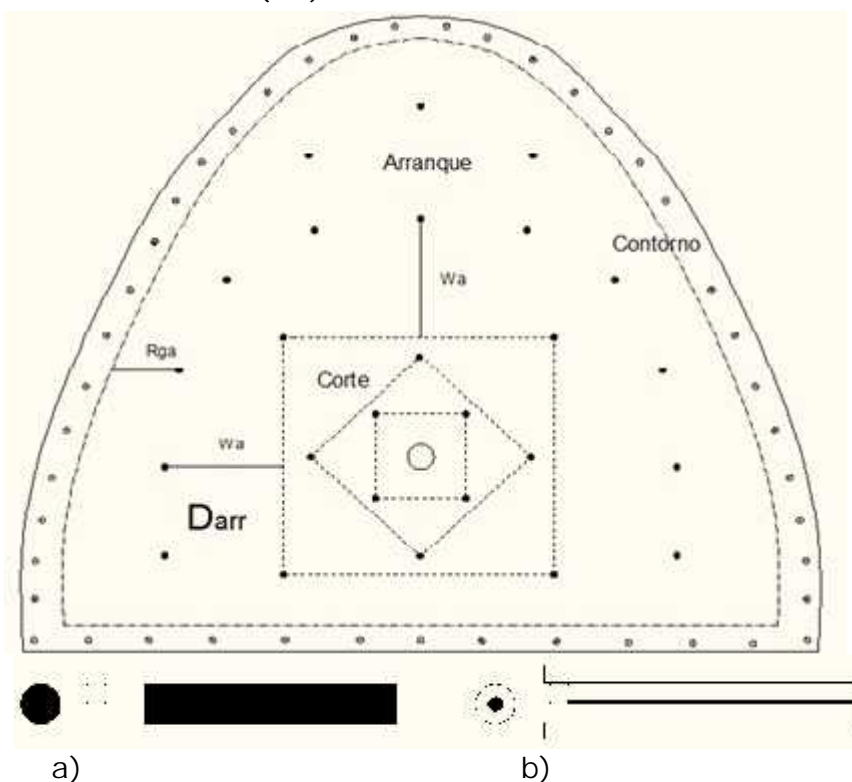


Figura 2. Ubicación y acople de las cargas en los barrenos; a) Cargas compactas para los barrenos de corte y arranque, b) Cargas desacopladas para los barrenos de contorno.

El diseño que se propone en el presente artículo considera la explosión de cargas desacopladas para los barrenos de contorno, y cargas compactas para el grupo de barrenos de corte y arranque (Figura 2).

La diferencia para el cálculo radica en la presión en el frente de la onda de detonación; para el caso de cargas compactas se determina como:

$$p_{\max} = \frac{\rho_{se} (v_d)^2}{k + 1}, \text{ Pa} \quad (1)$$

Donde:

ρ_{se} – Densidad de la sustancia explosiva, kg/m^3

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

K – Índice de la adiabática de los productos de la explosión.

Mientras que para la explosión de cargas desacopladas con espacio anular de aire:

$$p = p_{\max} \left(\frac{V_{se}}{V_b} \right)^k = p_{\max} \left(\frac{d_{se}}{d_b} \right)^{2k}, \text{ Pa} \quad (2)$$

Donde:

d_{se} : diámetro que ocupa la carga de SE en el barreno; m

d_b : diámetro del barreno; m

El resto de los pasos se calculan según se explica en el artículo antes citado.

2.3.1 Diseño del cuele

Los cueles pueden clasificarse atendiendo a dos grandes grupos (López Jimeno 1994):

- a) Cueles de barrenos paralelos
- b) Cueles de barrenos con ángulos.

Los primeros son los que más se emplean en proyectos con perforación mecanizada, mientras que los del segundo grupo han caído en desuso por la laboriosidad de la perforación y solo se aplican en ocasiones en excavaciones pequeñas, por lo que no serán abordado en el presente artículo.

Cueles con barrenos paralelos

Actualmente, es el tipo de cuele que se utiliza con mayor frecuencia en la excavación de túneles y galerías, con independencia de las dimensiones

de estas (López Jimeno 1994). Consta de uno o dos barrenos vacíos de expansión, hacia los que rompen escalonadamente los barrenos cargados. Los cueles con barrenos paralelos más empleados son el de tres y cuatro secciones, por la sencillez, facilidad de replanteo y ejecución. Teniendo en cuenta las dimensiones de la excavación y las características del equipamiento de perforación se empleó el cuele de tres secciones.

Cálculo de los parámetros del cuele de tres secciones

- Línea de menor resistencia

$$B_1 = Rt_c + \frac{D_t}{2} ; \text{ m} \quad (3)$$

$$B_2 = 1,41 * B_1 ; \text{ m} \quad (4)$$

$$B_3 = 2,12 * B_2 ; \text{ m} \quad (5)$$

Donde:

Rt_c : Radio de trituración que produce la explosión de las cargas de los barrenos del cuele; m

B_1 : Distancia del barreo cargado al taladro vacío o de compensación; m (Figura 3).

B_2 : Distancia de los barrenos de la segunda sección al centro de unión de las cargas se la sección anterior; m

B_3 : Distancia de los barrenos de la tercera sección al centro de unión de las cargas se la sección anterior; m

D_t : Diámetro del taladro de compensación; m

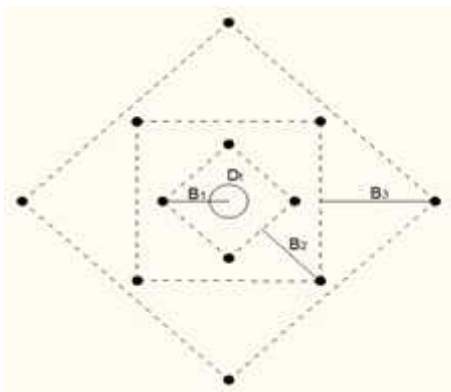


Figura 3. Diseño del cuele de tres secciones.

- Longitud de relleno

Para el cálculo de la longitud de relleno se toma la porción superior de la carga, con longitud $\Delta l_c = (4-5)d_b$, de modo que se pueda considerar como una carga concentrada y se determina el radio de esta carga como si fuera una carga esférica (Borovikov & Vaniagin 1985).

$$l_r = \bar{l}_r * (R_c^{esf})^e \quad (6)$$

Donde:

\bar{l}_r : Longitud relativa de relleno

$(R_c^{esf})^e$: Radio de carga esférica equivalente

R_c^{esf} : Radio de carga esférica; m

$$R_c^{esf} = \sqrt[3]{\frac{3}{16}(d_b)^2 * \Delta l_c}; \text{ m} \quad (7)$$

Donde:

d_b : Diámetro del barreno; m

$$(R_c^{esf})^e = R_c^{esf} \left(\frac{\dots_{se} * Q_{se}}{\dots_p * Q_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Donde:

\dots_{se} y \dots_p : Densidad de la sustancia explosiva utilizada y patrón, respectivamente ($\dots_p = 1\ 500\ \text{kg/m}^3$)

Q_{se} y Q_p : Calor de la explosión de la sustancia explosiva utilizada y patrón, respectivamente ($Q_p = 5\ 950\ \text{kJ/kg}$).

$$\bar{l}_r = \frac{1}{2} * \left[1 + \left(\frac{\sim}{1 - \sim} \right)^{0,5} \right] * \left(\frac{2,25 * \dots_o * V_l}{[\dagger_t^d]} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Donde:

μ : Coeficiente de Poisson

\dots_o : Densidad de las rocas; t/m^3

V_l : Velocidad de las ondas elásticas longitudinales; m/s

σ_t^d : Límite de resistencia a tracción dinámica de las rocas; MPa

- Longitud de la carga

$$L_c = L_b - l_r; \text{ m} \quad (10)$$

Donde:

L_b : Longitud del barreno; m

- Número de cartuchos en cada barreno

$$N_c = ENT\left(\frac{L_c}{l_{cart}}\right); \text{ cartuchos} \quad (11)$$

Donde:

l_{cart} : Longitud del cartucho; m

- Número total de cartuchos

$$N_T = N_c * N_b \quad (12)$$

Donde:

N_b : Número de barrenos a emplear por grupo

- Magnitud de la carga para los barrenos de cuele

$$Q = N_T * m_c; \text{ kg} \quad (13)$$

Donde:

m_c : masa de un cartucho; kg.

2.3.2 Diseño de los barrenos de arranque

A consecuencia de la voladura de los barrenos de cuele se debe crear una cavidad suficiente y necesaria que permita la formación de la segunda superficie libre. Los parámetros principales de los barrenos de arranque son:

- Línea de menor resistencia de los barrenos de arranque

$$W_a = \frac{Rg_a + Rd_a}{2} * K_{och}; \text{ m} \quad (14)$$

Donde:

Rg_a : Radio de agrietamiento que produce la explosión de las cargas de los barrenos de arranque; m

Rd : Radio de descostramiento que produce la explosión de las cargas de los barrenos de arranque; m

$Koch$: Coeficiente de orientación del agrietamiento; 0,85 (Tabla 3).

Tabla 3. Orientación del sistema de agrietamiento principal respecto a la superficie libre y a la dirección de la onda de choque

Nº	Ángulo	K_{och}
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

- Distancia entre barrenos de arranque

$$D_{arr} = 2 R_{ga} * K_{och}; m \quad (15)$$

- Longitud de los barrenos de arranque

$$L_a = L_c - W_a * \tan \alpha; m \quad (16)$$

Donde:

L_c : Longitud de los barrenos de cuele; m

α : Ángulo de arranque, oscila de 10° a 45° , se eligió 15° . Los menores valores se toman para macizos agrietados de fortaleza media, mientras que los mayores corresponden a macizos monolíticos de gran fortaleza (Figura 4)

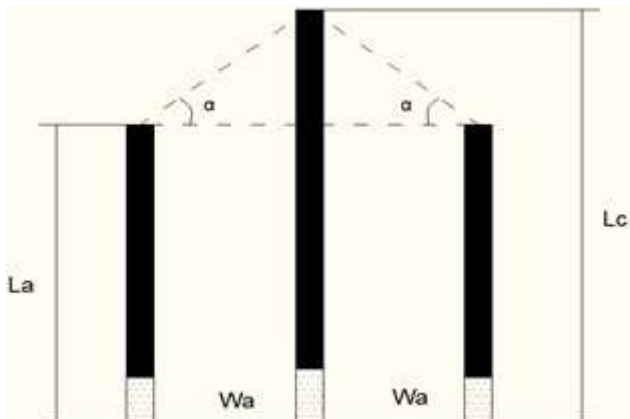


Figura 4. Profundidad de los barrenos de arranque.

- Cantidad de barrenos de arranque

El número de barrenos de arranque (N_a) se determina luego de delimitar el área de ubicación de los mismos, a partir de considerar la línea de menor de resistencia (W_a) y el radio de agrietamiento (R_{ga}), (Figura 2). Los mismos se distribuyen a la distancia calculada en la expresión 15.

A partir de determinar la longitud de los barrenos de arranque se calculan los restantes parámetros (longitud de relleno, longitud de carga, número

de cartuchos en cada barreno y magnitud de carga para los barrenos de arranque) siguiendo el mismo procedimiento que para los barrenos de corte descritos en las ecuaciones 6 a 13.

2.3.3 Diseño de los barrenos de contorno

El diseño de los parámetros de este grupo de barrenos se debe realizar sobre la base de utilizar cargas desacopladas con espacios radiales de aire, esta tecnología es imprescindible para lograr contornos rocosos más lisos y menos agrietados, con los cuales se obtiene mayor estabilidad de las excavaciones, disminuyen los riesgos de accidentes y las superficies denudadas de las excavaciones ofrecen menos resistencia aerodinámica al paso del aire y del agua por la excavación. Los parámetros principales son: la distancia entre los barrenos de contorno (a_{co}) y la distancia del eje del barreno de contorno al contorno proyectado de la excavación (c), (Figura 5).

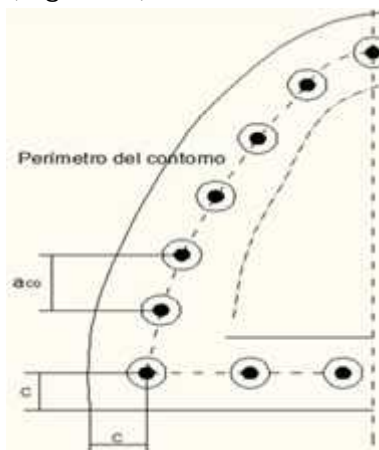


Figura 5. Ubicación de los barrenos de contorno.

- Distancia entre cargas en el contorno

$$a_{co} = 2Rg_{co} * k_{och}; \text{ m} \quad (17)$$

Donde:

Rg_{co} : Radio de agrietamiento que produce la explosión de las cargas de los barrenos de contorno; m

Distancia del eje del barreno al contorno proyectado de la excavación

$$c = Rtc; \text{ m} \quad (18)$$

Donde:

Rtc : Radio de trituración que produce la explosión de las cargas de los barrenos de contorno; m

- Cantidad de barrenos de contorno

$$N_{co} = \frac{P_{co}}{a_{co}}; \text{ barrenos} \quad (19)$$

Donde:

P_{co} : Perímetro que ocupan los barrenos de contorno considerando la distancia c ; 19,29 m

- Longitud de los barrenos de contorno

$$L_{co} = L_a; \text{ m} \quad (20)$$

- Longitud de la carga de cordón detonante

$$L_{cor} = 0,90 * L_{co}; \text{ m} \quad (21)$$

- Longitud de relleno

$$L_{rco} = L_{co} - L_{cor}; \text{ m}$$

- Longitud total de cordón detonante

$$L_{tc} = L_{cor} * N_{co}; \text{ m} \quad (22)$$

- Magnitud de la carga para los barrenos de contorno

$$Q_t = L_{tc} * m_{co}; \text{ kg} \quad (23)$$

Donde:

m_{co} : Gramaje del cordón detonante; 42 g/m

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Campo tenso-deformacional

A partir de realizar el cálculo de las tensiones que producen las cargas acopladas y desacopladas para los diferentes grupos de barrenos se determinaron los radios de trituración, agrietamiento y descostramiento a emplear en el diseño de las voladuras de contorno (Tabla 4).

Tabla 4. Distancias límites de las tensiones en el macizo

Rtc (m)	Rtco (m)	Rga (m)	Rgco (m)	Rda (m)
0,12	0,06	0,58	0,44	1,44

3.2 Diseño del corte o cuele

El diseño de los barrenos de corte tiene en cuenta la geometría del cuele (distancia entre el taladro de compensación y el resto de las cargas) y los demás parámetros que incluyen la cantidad de barrenos y la carga necesaria para realizar la explosión (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros de diseño de los barrenos de cuele

B1 (m)	B2 (m)	B3 (m)	Lb (m)	Lc (m)	Lr (m)	Nc (cartuchos)	N _T (cartuchos)	Nb (barrenos)	Q (kg)
0,17	0,24	0,50	3,20	2,00	1,20	4	48	12	21,84

3.3 Diseño de los barrenos de arranque

Una vez realizado el diseño del corte se establecen los parámetros de los barrenos de arranque (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros de diseño de los barrenos de arranque

Wa (m)	Darr (m)	La (m)	Lc (m)	Lr (m)	Nc (cartuchos)	N _T (cartuchos)	Nb (barrenos)	Q (kg)
0,86	1,00	3,00	2,00	1,00	4	76	19	34,58

Como puede apreciarse en la tabla la longitud de los barrenos de arranque es 0,2 m menor que la profundidad del grupo de barrenos de cuele, este permite una salida del volumen de rocas arrancadas más efectivas al realizar la explosión con fondo libre.

3.4 Diseño de los barrenos de contorno

En la Tabla 7 se muestra el diseño del grupo de barrenos de contorno, que son los que permiten dar el contorneado de la excavación para disminuir la sobrexcaación y aumentar la estabilidad de la obra.

Tabla 7. Parámetros de diseño de los barrenos de contorno

aco (m)	c (m)	Lco (m)	Lcor (m)	Lrco (m)	Nco (barrenos)	Ltc (m)	Qt (kg)
0,74	0,06	3,00	2,70	0,30	30	70,20	2,95

3.5 Diseño del patrón de voladura de contorno

El diseño final comprende la ubicación de las cargas en el frente de la excavación de los tres grupos de barrenos (Figura 7) y la secuencia de retardo para la salida de la explosión (Tabla 8).

El diseño de voladura de contorno propuesto permitió elevar los indicadores de eficiencia del arranque por voladura de las rocas. Se redujeron los consumos de hormigón gunitado debido a la reducción de la sobrexcaación, así como los gastos por escombreción y transportación de la masa rocosa arrancada. El área promedio obtenida de la sección

trasversal del túnel, después de realizar seis voladuras, fue de 30,09 m², tan solo 0,82 m² por encima de la exigida en proyecto y 9,96 m² menor que la alcanzada antes de la realización de la presente investigación (Figura 6).

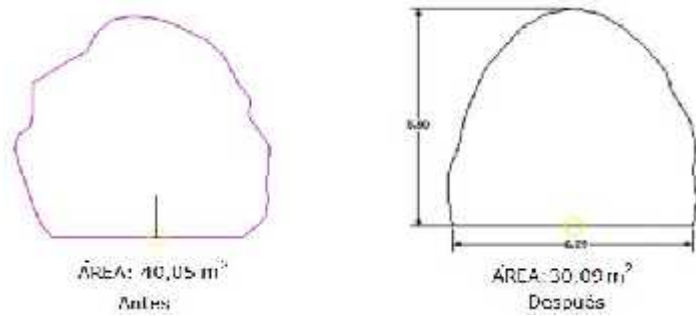


Figura 6. Área de la sección transversal del túnel antes y después de la voladura de contorno.

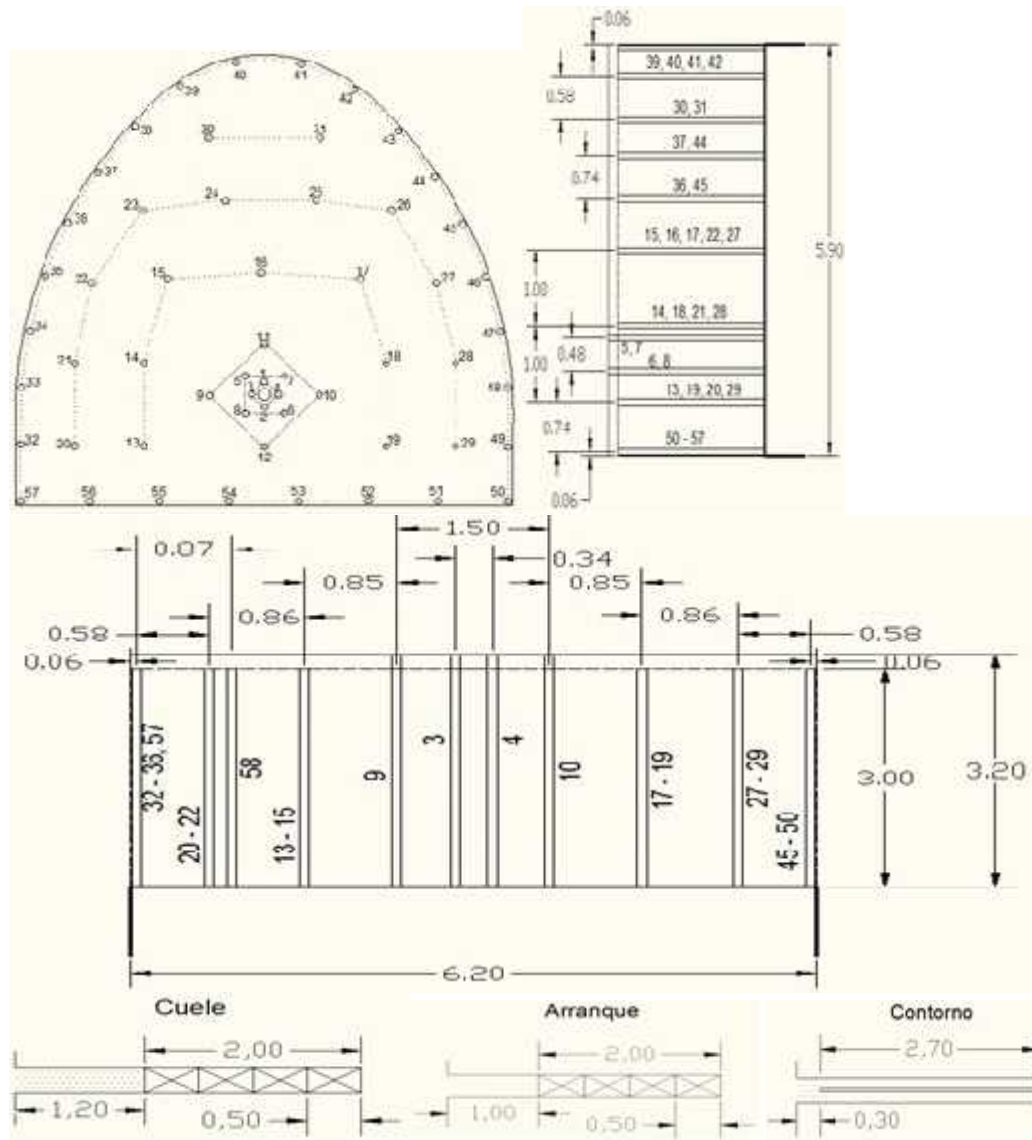


Figura 7. Diseño final de la voladura de contorno.

Tabla 8. Orden de salida de la explosión por grupos de barrenos

Cuele		Arranque		Contorno	
Nº de barreno	Serie de retardo	Nº de barreno	Serie de retardo	Nº de barreno	Serie de retardo
1-2	MS 2	13-19	LP 3	32-49	LP 6
3-4	MS 4	20-29	LP 4	51 -56	LP 6
5-6	MS 6	30-31	LP 5	50, 57	LP 7
7-8	MS 8				
9-12	MS 9				

4. CONCLUSIONES

La inclusión de las propiedades de las sustancias explosivas y de la acción de la explosión sobre el macizo de rocas a la metodología para el diseño de voladuras de contorno en túneles hace más eficiente el resultado de la voladura porque disminuye la sobrexcautación y, por consiguiente, los gastos de laboreo por concepto de sostenimiento al conseguir una mayor estabilidad en la obra subterránea. Con la aplicación de esta metodología en el túnel Levisa-Mayarí la sobrexcautación disminuyó en un 34,03 %, lo que significa una reducción de su valor de 10,78 m² a 0,82 m².

5. REFERENCIAS

- BOROVNIKOV, V. A. & VANIAGUIN, I. F. 1974: Física de la fragmentación explosiva. IML. Instituto de Minas de San Petersburgo. 60 p.
- DIÉGUEZ-GARCÍA, Y. 2013: Campo tenso-deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles. *Minería y Geología* 29(3): 38-55.
- EXSA S.A. Manual práctico de voladura. Consulta: 21 nov 2013. Disponible en: <http://downloadpdfz.com/pdf/manual-de-voladura>.
- LANGFORS, U. & KIHSTROM, B. 1976: Técnica moderna de voladuras de rocas. Urmo, S. A., Bilbao (España), 425 p.
- MONTORO, J. & LAMPAYA, J.: Consideraciones acerca de la técnica de precorte (En soporte digital). Descargado de: <http://es.scribd.com/doc/36333255/25-Voladuras-de-contorno>. Marzo, 2013.
- OTAÑO-NOGUEL, J. 1998: Fragmentación de rocas con explosivos. 2 ed. Félix Varela, La Habana, 446 p.
- LOPEZ-JIMENO, C.; PERNIA-LLERA, J.; ORTIZ DE URBINA, F. & LÓPEZ-JIMENO, E. 1988: Manual de perforación y voladuras de rocas. ETIMSA, Madrid, 442 p.
- SARGENTÓN-ROMERO, G. 2007: Criterio de triturabilidad para la proyección de los cueles rectos triturantes con taladros de compensación. *Minería y Geología* 23(4): 51-67

SARGENTÓN–ROMERO, G. 2008: Criterios para el diseño de voladuras de contorno en el laboreo de excavaciones subterráneas. Tesis de doctorado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 91 p.

ULAEX S.A. 1999: Unión Latinoamericana de Explosivos S. A. Editorial SIMAR S. A., 32 p.

Yoandro Diéguez-García. ygdieguez@ismm.edu.cu
Máster en Minería. Profesor Auxiliar.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

José Otaño-Noguel. joseot@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.

Gilberto Sargentón-Romero. grr@fe.uho.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas.
Universidad de Holguín, Cuba.