

Diseño de voladuras de contorno por recorte con cordón detonante de alto gramaje en la excavación de túneles

Contour blasting design by heavy weight detonating cord for tunnels digging

Gilberto Sargentón Romero

Universidad de Holguín, Cuba.

Resumen

Este artículo expone nuevos criterios para el diseño de voladuras de contorno con cargas desacopladas para la excavación de túneles en rocas pseudoplásticas. Teóricamente, estos criterios están soportados en la modelación del campo de tensiones y deformaciones que se produce en un medio rocoso, alrededor de los barrenos de contorno, al detonar un cordón de alto gramaje. Resultados de otros investigadores con los criterios preexistentes se compararon con estudios experimentales usando los criterios expuestos en el presente trabajo y se comprueba que estos permiten ajustar más rápidamente los patrones y, en general, obtener mejores indicadores de los trabajos de perforación y voladura en la excavación de túneles.

Palabras clave: voladura de contorno por recorte; diseño de voladuras; barrenos de contorno; cordón detonante de alto gramaje; excavación de túneles.

Abstract

This article presents new criteria for the design of contour blasting with decoupled loads for digging tunnels in pseudoplastic rocks. Theoretically, these criteria are based on the modeling of the tension field and deformations that occurs in a rocky environment, around the boreholes, when detonating a heavy-weight cord. By using these criteria, experimental results from other researchers were compared with pre-existing criteria and

it was verified that they allow adjusting the patterns more quickly and, in general, obtaining better indicators of the drilling and blasting work in the tunnels digging.

Keywords: contour blasting by clipping; blast holes designs; contour holes; heavy weight detonating cord; tunnels digging.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes procedimientos de diseño de voladuras de contorno por recorte en el laboreo de túneles, los cuales han sido tratados por diversos investigadores (Baron y Kliuchnikov 1967; Lijin, Zilbersmith y Pravin 1973; Langefors y Kihlström 1976; Noskov, Komashenko y Zhavin 1980; Azarkovich *et al.* 1984; Matveichuk y Chursalov 2002; López-Jimeno, López-Jimeno y García-Bermúdez 2003).

Los principios de cálculo de estos procedimientos se han basado en la generalización de la experiencia práctica y la utilización de expresiones empíricas y semiempíricas obtenidas por correlación entre los parámetros de la voladura de contorno, y han sido utilizados en el diseño de las voladuras de contorno mediante la aplicación del método de analogía. Sin embargo, estos principios solo son válidos cuando son utilizados en condiciones análogas a las condiciones en que fueron obtenidos. Es por ello que en condiciones diferentes la utilización del método empírico de diseño atenta, por un lado contra la efectividad del contorneado, la estabilidad y la seguridad de los trabajos de excavación y, por otro, no permite un ajuste rápido de los patrones o pasaportes de voladura, en particular en los macizos rocosos cubanos mucho más jóvenes y con una tectónica más complicada que los europeos, en cuyas condiciones fue elaborado este método empírico.

La efectividad alcanzada con la voladura de contorno diseñada con el método empírico puede ser incrementada mediante el empleo de criterios que se fundamenten en la acción física sobre el medio rocoso pseudoplástico del cordón detonante de alto gramaje colocado en el barrenado de contorno. La esencia del diseño de la voladura de contorno de recorte consiste en determinar, primeramente, una distancia tal entre los barrenos de contorno, a_{cont} , en la fila que permita el corte por la línea de unión de las cargas; además, una relación entre esta distancia y la línea de menor resistencia W , que impida que la onda de descarga al llegar al contorno de proyecto produzca daños de consideración en dicho contorno, y finalmente, el

necesario desacople de las cargas en los barrenos de contorno para reducir al mínimo posible el daño sobre el contorno obtenido.

Langefors y Kihlström (1976) proponen, como resultado de experimentos a escala de laboratorio en vidrio orgánico, la siguiente expresión para determinar la distancia entre barrenos de contorno:

$$a_{\text{cont}} = (0,8 \div 1,25) W \quad (1)$$

Este principio de diseño tiene como fundamento físico evitar el daño en la roca cercana al contorno por la acción de la onda reflejada, como se aprecia en la Figura 1.

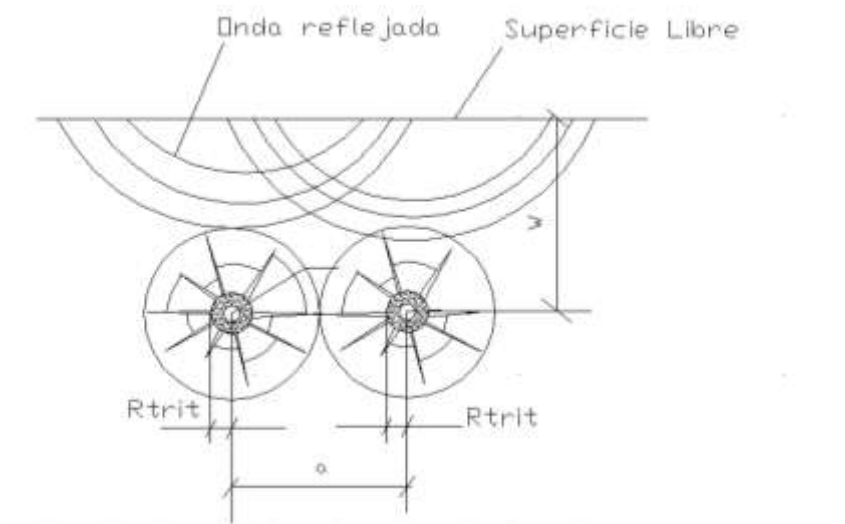


Figura 1. Representación gráfica del criterio de diseño de Langefors.

Gustafson (1976) generaliza la experiencia obtenida en las voladuras por recorte con la sustancia explosiva gurita en Suecia (Tabla 1). Manifiesta, además, que la disposición de los barrenos se corrige a partir de las propiedades concretas de las rocas para obtener mejores resultados. En la Tabla 1 la relación entre la distancia entre barrenos y la línea de menor resistencia es aproximadamente 0,8.

Tabla 1. Parámetros de las cargas en la voladura de contorno

Diámetro del barreno, mm	Concentración de la carga, kg/m	Diámetro del cartucho de gurita, mm	LMR, W,m	Distancia entre barrenos de contorno, a
25-32	0,07	11	0,45	0,35
25-43	0,16	17	0,7-0,8	0,5-0,6

48-51	0,16*	17	0,8-0,9	0,6-0,7
48	0,30	22	1,0	0,8
64	0,36	22	1,0-1,1	0,8-0,9

*en rocas de fácil volabilidad.

Como se puede apreciar se utiliza el método de analogía para el diseño de la voladura y la realización de voladuras experimentales para ajustarla a las condiciones concretas en que se desea hacer el proyecto.

Noskov, Komashenko y Zhavin (1980) establecen las siguientes expresiones para determinar los parámetros del diseño de la voladura de contorno de recorte:

$$a_{\text{cont}} \leq (0,8 \div 1,0)(W_{\text{cont}} - l_t) \quad (2)$$

$$W = \sqrt{\frac{k_{\text{ll}} \gamma_b}{qm}} \quad (3)$$

$$p_{\text{cont}} = \left[0,4 + k_{\text{ar}} \left(0,63 - \frac{2,1}{f} \right) \right] W_{\text{cont}} \quad (4)$$

Donde: a_{cont} - distancia entre los barrenos de contorno, m;

W_{cont} - línea de menor resistencia de los barrenos de contorno, m;

p_{cont} - cantidad de sustancia explosiva en 1 m de barreno de contorno, kg/m;

k_{ar} - coeficiente de agrietamiento relativo (valor tabulado);

l_t - agrietamiento inducido por los barrenos de arranque, m;

k_{ll} - Coeficiente de llenado de los barrenos;

γ_b - Densidad lineal de carga de los barrenos de contorno, kg/m;

q_{SE} - Consumo específico de sustancia explosiva, kg/m³;

m - Coeficiente de aproximación de las cargas;

f - Índice de fortaleza de las rocas.

Estas expresiones, al igual que las de Gustafsson (1976), se obtienen por vía experimental y mediante correlación con el índice de fortaleza de las rocas. Por su parte, Azarkovich (1984) formula las siguientes ecuaciones de cálculo:

$$W = 0,8 \sqrt{\rho_{\text{cc}} e} \quad (5)$$

$$a_{\text{cont}} = (0,8 \div 1,0)W_{\text{cont}} \quad (6)$$

$$\rho = 25e d_c^2 \left(\frac{\sigma_c}{k_{rp}k_{da}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

Donde: d_c - diámetro de la carga de contorno, m;

e – capacidad de trabajo relativa de la sustancia explosiva;

p_{cc} - masa lineal permisible de la carga de contorno, kg/m;

k_{rp} - coeficiente de refracción de la presión (valor tabulado);

k_{da} - coeficiente de debilitamiento del macizo de rocas debido al agrietamiento;

σ_{cmp} - resistencia a compresión de las rocas, MPa.

Con estas expresiones se obtienen buenos resultados al realizar voladuras en bancos mediante taladros. Matveichuk y Chursalov (2002) son partidarios de la expresión propuesta por Panin y Kovaliev (1984) para el cálculo de la distancia entre los barrenos de contorno:

$$a_{\text{cont}} = K d_{\text{cont}} \left(1 + 2^{\frac{1}{n}} \right) \left\{ \frac{2 \mu P_d \left(\frac{V_c}{V_b} \right)^{\gamma}}{[\sigma_t(1-\mu)(1+C)]} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

Donde: K -coeficiente que considera la orientación de las grietas naturales en el macizo de rocas respecto al plano de contorneado;

d_{cont} - diámetro de los barrenos de contorno, m;

μ - coeficiente de Poisson;

P_d - Presión de detonación en la carga de sustancia explosiva, Pa;

V_c – Volumen de la carga de sustancia explosiva, m³;

V_b - Volumen del barreno, m³;

$\gamma = 1,17-1,25$ - índice de la adiabática (isentrópica);

σ_t - límite de resistencia de la roca a la tracción, Pa;

C – magnitud adimensional;

m –grado de extinción de la onda de choque en la zona de fracturación.

El grado de extinción de la onda de choque en la zona de trituración es:

$$m = 2 + \frac{\mu}{1-\mu} \quad (9)$$

En la zona de formación de la grieta dirigida:

$$n = 2 - \frac{\mu}{1-\mu} \quad (10)$$

La presión de detonación (Pa) en la carga de sustancia explosiva se determina por la expresión:

$$P_d = 10\rho_{SE}V_d(4g) \quad (11)$$

Donde: ρ_{SE} - densidad de la sustancia explosiva, kg/m³;

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

10- coeficiente de conversión al Sistema Internacional de Unidades (SI);

g - aceleración de la caída libre, m/s².

$$C = \frac{\rho_{SE}V_d}{\rho_{roca}C_l} \quad (12)$$

Donde: ρ_{roca} - densidad de las rocas, kg/m³;

C_l - velocidad de propagación de las ondas longitudinales por la roca, m/s.

Sin embargo, cuando esta expresión es utilizada en el diseño de voladuras de contorno por recorte en túneles, con barrenos de 42 mm, no se obtienen los resultados deseados. López-Jimeno, López-Jimeno y García-Bermúdez (2003) declaran para voladuras de recorte una expresión obtenida por la correlación establecida entre la distancia entre barrenos de contorno y su diámetro, cuando se utilizan cargas desacopladas de sustancias explosivas:

$$\frac{a_{cont}}{a_b} = 13 \approx 16 \quad (13)$$

Esta última expresión se fundamenta en el principio de semejanza geométrica y solamente es válida cuando se diseñan voladuras en condiciones análogas a las condiciones en la que fue obtenida y no tiene en cuenta la semejanza energética de la sustancia explosiva.

De estos procedimientos los más utilizados son los de: Lijin, Zilbersmith y Pravin (1973); Taranov y Gusd (1976); Langefors y Kihlström (1976); Noskov, Komashenko y Zhavin (1980) y López-Jimeno, López-Jimeno y García-Bermúdez (2003).

Se debe señalar, además, que actualmente los túneles se excavan por trazados donde son muy variables las condiciones ingeniero-geológicas y

pueden presentarse zonas cuyas rocas posean un comportamiento plástico, elástico-plástico oseudoplástico.

A pesar de las investigaciones realizadas y los resultados obtenidos, el mecanismo de arranque mediante perforación y voladura en la voladura de contorno por recorte en rocas pseudoplásticas en el laboreo de túneles ha sido escasamente investigado y menos aún el del arranque de rocas plásticas con cordón detonante de alto gramaje. El diseño en estas condiciones de la voladura de contorno mediante el empleo de expresiones empíricas no permite alcanzar los indicadores de eficiencia y eficacia necesarios, en particular, los relacionados con la calidad del contorneado y la estabilidad de los túneles.

La efectividad de la voladura de contorno puede ser mejorada mediante el diseño de estas voladuras a partir de principios de diseño basados en la acción física de la explosión de la sustancia explosiva sobre el medio rocoso (Sargentón 1997; Sargentón y Batista 2005; Sargentón y Otaño 2007; Sargentón 2009; Sargentón, Diéguez y Palacios 2011).

Este artículo expone nuevos criterios para el diseño de voladuras de contorno con cargas desacopladas para la excavación de túneles en rocas pseudoplásticas. Desde el punto de vista teórico, estos criterios se sustentan en la modelación del campo de tensiones y deformaciones que se produce en un medio rocoso, alrededor de los barrenos de contorno, al detonar un cordón de alto gramaje.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El corte preciso por la línea de unión de los barrenos de contorno se obtiene, mediante la determinación del parámetro a_{cont} (Figura 2), por la expresión siguiente (Sargentón 2009):

$$a_{contorno} = 2 r_g k_g k_{op} \quad (14)$$

Donde:

r_g – radio de agrietamiento, m

k_g – coeficiente del grado de agrietamiento;

k_{op} – coeficiente de orientación de la grieta respecto a la onda de choque

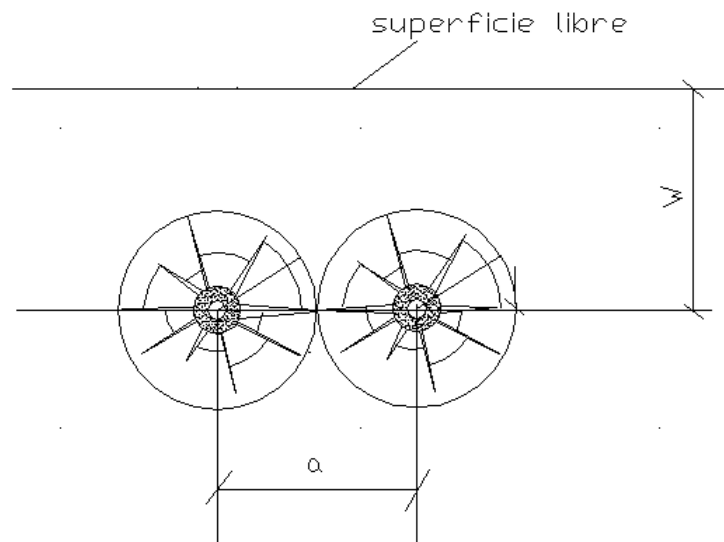


Figura 2. Representación geométrica del corte por la línea de unión entre las cargas de los barrenos de contorno.

En la expresión anterior, los coeficientes k_g y k_{op} se establecen a partir de las investigaciones de campo del agrietamiento y de su procesamiento en los trabajos de gabinete y son valores tabulados. Para lograr a_{cont} es necesario obtener r_g , el cual se determina mediante la modelación del campo de tensión y deformación alrededor de la carga de cordón detonante de alto gramaje, inmediatamente después de la voladura.

2.1. Determinación del radio de agrietamiento

El radio de agrietamiento depende de la onda de presión refractada a la roca por la acción física de la detonación del cordón detonante y de las componentes radiales, tangenciales y al cortante del campo de tensiones generado por dicha detonación y a partir de estas componentes los parámetros del campo de deformación destructiva: el radio de trituración, de agrietamiento y de descostramiento (Figura 3).

Para determinar la presión de la onda de tensión refractada a la roca es necesario obtener la presión en el frente de la onda de detonación, la presión de los productos de la detonación y la presión en la cámara de carga, por las expresiones siguientes:

Presión de la onda de detonación en el punto de Chapman-Jouguet producida por el cordón detonante de alto gramaje:

$$P_{onda\ det} = \left(\frac{v_d^2}{n_p + 1} \right), \text{ Pa} \quad (15)$$

n_p - índice de la politrópica de los productos de la explosión que depende de la densidad inicial de la sustancia explosiva.

La presión promedio de los productos de la detonación:

$$P_{proddet} = \frac{P_{ondadet}}{2}, \text{Pa} \quad (16)$$

Conocidas las magnitudes de estas presiones, la presión en la cámara de carga se determina por la expresión:

$$P_{camaracarga} = \left(\frac{d_c^2}{d_b^2} \right)^\gamma P_{proddet}, \text{Pa} \quad (17)$$

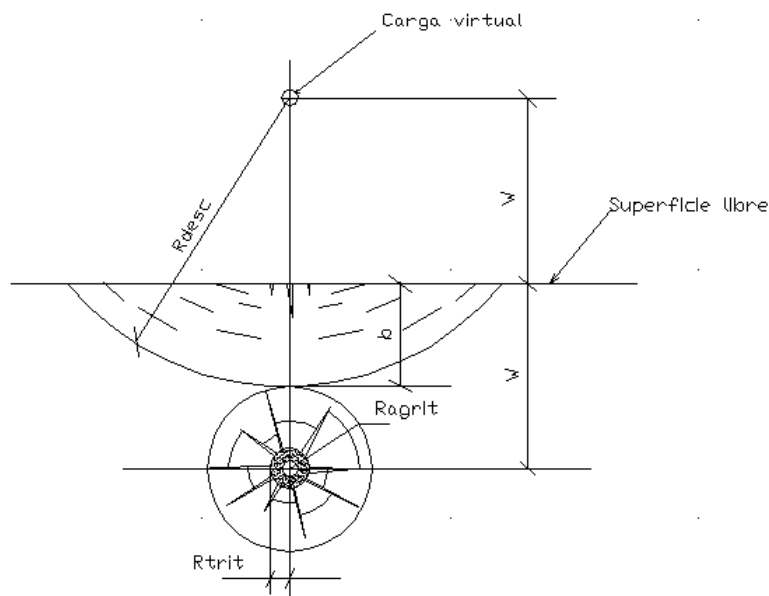


Figura 3. Representación geométrica del campo de deformación producido por una carga aislada compacta en un medio rocoso W-línea de menor resistencia, b-espesor de rocas fragmentadas por descostramiento) (Sargentón 2009).

Donde: γ es el índice de la adiabática (isentrópica) de los gases de la explosión.

d_c - diámetro de la carga de la sustancia explosiva, en este caso diámetro del cordón detonante de alto gramaje.

El cálculo de la presión en la cámara de carga se realiza a partir de concebir el proceso de detonación de la carga de cordón detonante de alto gramaje dentro de la cámara de carga como un proceso termodinámico de expansión adiabática a entropía constante (isentrópico), pues la rapidez del proceso de detonación y la existencia de un espacio anular de aire ($e=13$ mm), entre el cordón detonante de alto gramaje ($d_c=8$ mm) y las paredes del barreno

($d_b=42$ mm), hace posible desestimar las pérdidas de calor que se producen con la explosión. El índice de la adiabática (isentrópica) se puede determinar por vía analítica:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (18)$$

Donde: C_p - calor específico promedio de todos los productos de la explosión a presión constante, J/ ° C;

C_v - calor específico promedio de todos los productos de la explosión a volumen constante, J/ ° C.

También se puede determinar γ por vía experimental o asumirlo a partir de la experiencia práctica.

La presión refractada se determina por la ecuación:

$$P_{ref} = P_{ccarg} K_{refracc} \quad (19)$$

Donde: $K_{refracc}$ - es el coeficiente de refracción

$$K_{ref} = \frac{2 V_{LD} \rho_{roca}}{(V_{LD} \rho_{roca} + V_{pdet} \rho_{pdet})} \quad (20)$$

Donde: V_{LD} - velocidad longitudinal de la onda en el testigo de roca, m/s;

ρ_{roca} - densidad de las rocas, kg/m³;

$V_{prod det}$ - velocidad de los productos de la detonación, m/s;

$\rho_{prod det}$ - densidad de los productos de la detonación, kg/m³.

Como se aprecia, las presiones anteriormente señaladas dependen de las condiciones de la voladura (características del explosivo) y de las condiciones ingeniero-geológicas.

2.2. Condiciones de la voladura

Tipo de explosivo

Cordón detonante de alto gramaje de tetranitrato de pentaeritrita (PETN o TEN), (Figura 4)

Diámetro del cordón: 8,1 mm

Gramaje del cordón: 40 g/m

Características explosivas del PETN:

Fórmula química: $C(CH_2ONO_2)_4$

Densidad $\rho_{\text{cordón}} = 1\,620\text{ kg/m}^3$;

$V_{\text{cordón}} = 6\,500\text{ m/s}$

$Q_{\text{cordón}} = 3\,150\text{ kJ/kg}$

Balance de oxígeno: -10,1.

El cálculo del calor de la explosión se realizó a partir de la Ley de Hess (Sargentón, Diéguez y Palacios 2011).



Figura 4. Cordón detonante de alto gramaje utilizado en la voladura de contorno por recorte en el túnel de Buenaventura (Trasvase Este-Oeste).

2.3. Condiciones ingeniero-geológicas

Tipo de roca: argilitas.



Figura 5. Monolito de la roca argilita extraído del frente del túnel de Buenaventura para preparar los testigos para los ensayos de tracción y compresión.



Figura 6. Testigos cilíndricos de la roca argilita utilizados en los ensayos para determinar la resistencia a tracción y compresión.

Densidad de la roca: $\rho_{roca} = 2\,715 \text{ kg/m}^3$; $V_{LD} = 1\,373 \text{ m/s}$; $\sigma_c^e = 1 \text{ MPa}$; $\sigma_t^e = 0,23 \text{ MPa}$ (Capote 2011).

2.3.1. Características del agrietamiento

Sistema principal: dirección 63° , buzamiento: 31° .

Sistemas secundarios: dirección 43°, buzamiento 19°; dirección 255°, buzamiento 30°. Espaciamiento entre grietas del sistema principal: 0,40 m. Ángulo entre el eje del túnel y el plano principal de agrietamiento: 27° (Figura 7).

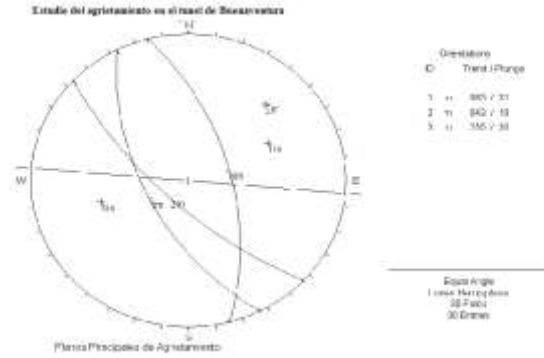


Figura 7. Sistemas de agrietamiento principales en el túnel de Buenaventura (Tramo de túnel del Traspase Este-Oeste).

2.4. Modelación de las componentes del campo de tensión-deformación

Conocida la presión refractada a la roca se realiza la determinación del campo de tensiones para cargas con espacio anular de aire por el modelo de Borovikov y Vaniagin (1974, 1984 y 1995).

Las componentes radiales de la onda de tensiones se determinan por la expresión:

$$\sigma_{\text{radmax}} = P_{\text{ref}} \quad (21)$$

$$\bar{R} = \frac{R_b}{R_{ce}} \quad (22)$$

$$R_{ce} = R_c \left(\frac{\rho_{SE} Q_{SE}}{\rho_T Q_T} \right)^{1/2} \quad (23)$$

$$\bar{r} = \frac{r}{R_{ce}} \quad (24)$$

Donde: R_b – es el radio del barreno, mm;

R_c - radio de carga de la sustancia explosiva (tetranitrato de pentaeritrita), mm;

R_{CE} – radio de carga equivalente, mm;

ρ_{SE} - densidad de la sustancia explosiva (cordón detonante de tetranitrato de pentaeritrita), kg/m³;

Q_{SE} - calor de explosión de la sustancia explosiva, kJ/kg;

Q_T - calor de explosión del Trotil, kJ/kg;

ρ_T - densidad del Trotil, kg/m³;

r - distancia desde un punto hasta el centro de la carga en la cual son examinadas las componentes radiales de la onda de tensiones, m.

Las componentes tangenciales se calculan por la expresión:

$$\sigma_{\tan\max} = (C_1 + C_2 \bar{r}) \sigma_{\text{rad}\max} \quad (25)$$

Donde:

$$C_1 = 0,09 + 0,228 * 10^{-7} \rho_{\text{roca}} V_{LD} \quad (26)$$

$$C_2 = (0,07 - 0,224 * 10^{-7} \rho_{\text{roca}} V_{LD}) * 10^{-2} \quad (27)$$

Los esfuerzos al cortante se determinan por la expresión:

$$\sigma_{\text{cort}\max} = \frac{\sigma_{r\max} - \sigma_{y\max}}{2} \quad (28)$$

2.5. Determinación del radio de agrietamiento

A partir de la resistencia estática a la compresión y la tracción, determinadas mediante ensayos de laboratorio, se determinaron las resistencias dinámicas de las rocas a la compresión y a la tracción mediante las expresiones de Borovikov y Vanyagin (1974):

$$[\sigma_{\text{trac}}^d] = K_{\text{trac}}^d [\sigma_{\text{trac}}^e] \quad (29)$$

$$K_{\text{trac}}^d = 4,81 - 0,97 * 10^{-11} \rho_{\text{roca}} V_{LD}^2 \quad (30)$$

$$[\sigma_{\text{comp}}^d] = K_{\text{comp}}^d [\sigma_{\text{comp}}^e] \quad (31)$$

$$K_{\text{comp}}^d = 15,38 - 0,9 * 10^{-11} \rho_{\text{roca}} V_{LD}^2 \quad (32)$$

Los radios de agrietamiento y de descostramiento se calcularon a partir de la resistencia dinámica a la tracción y a la compresión mediante los criterios siguientes (Sargentón 2009):

$$\text{Criterio de agrietamiento} \quad \sigma_{\tan\max} \geq \frac{[\sigma_{\text{tracc}}^d]}{2} \quad (33)$$

$$\text{Criterio de descostramiento} \quad \sigma_{\text{rad}\max} \geq \sigma_{\text{trac}}^d \quad (34)$$

Para determinar los valores de $R_{\text{tritución}}$ y $R_{\text{descostramiento}}$ se le asignan valores a la variable $\bar{r}$ en las expresiones (21) y (25) y los valores de σ_{tanmax} obtenidos se someten a los criterios de agrietamiento y descostramiento mediante las expresiones de cálculo (33) y (34) modificados a:

$$\sigma_{\text{tanmax}} \simeq \frac{[\sigma_{\text{tracc}}^d]}{2} \quad (35)$$

$$\sigma_{\text{radmax}} \simeq \sigma_{\text{trac}}^d \quad (36)$$

Cuando las expresiones de cálculo (35) y (36) se cumplen, los valores de $\bar{r}$ correspondientes se asumen igual a $R_{\text{tritución}}$ y $R_{\text{descostramiento}}$ respectivamente.

2.6. Validación mediante voladuras experimentales

Para la validación de los criterios de diseño de las voladuras de contorno por recorte con cordón detonante de alto gramaje en rocas pseudoplásticas se realizaron voladuras experimentales de polígono e industriales en los frentes de excavación de los túneles del Traspase Este-Oeste laboreados por argilitas, calizas y aleurolitas (Figura 8).



Figura 8. Registro fotográfico del contorneado obtenido con la voladura de los barrenos de contorno con cordón detonante de alto gramaje de 40 g/m y 8,1 mm de diámetro (a), proceso de carga de los barrenos de contorno cargados con cordón detonante. Los registros fotográficos a) y b) corresponden a las argilitas en el frente de excavación del túnel de Buenaventura.

Se realizaron diez voladuras experimentales en argilitas por el método de diseño, fundamentado en la acción física de la explosión sobre el medio rocoso pseudoplástico, e igual cantidad de voladuras por el método empírico en la misma litología, con el objetivo de comparar los resultados alcanzados por ambos métodos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se muestran los valores de P_{ref} determinados por las expresiones (19) y (20) para las litologías presentes en los frentes de excavación Yagrumal, Ojo de Agua, Castellanos y Buenaventura (Trasvase Este-Oeste). Como se aprecia, la presión refractada en las argilitas es menor que en las aleurolitas y en las calizas debido a que las primeras tienen una menor impedancia acústica.

En la Tabla 3 se muestran las componentes del campo tensional calculadas por las expresiones (21), (25) y (28), conocido el valor de $P_{refract} = 54$ MPa, correspondiente a la litología argilita.

Tabla 2. Presión de la onda refractada a la roca producida por la carga de una tira de cordón detonante de alto gramaje de pentrita en diferentes litologías de roca

Litologías	Tramo de túnel	$P_{refract}$ MPa
Argilitas	Buenaventura	54
Aleurolitas	Yagrumal	73
Caliza masiva	Ojo de Agua	87
Calizas blancas masivas	Castellanos	54
Calizas margosas	Buenaventura	64
Gabro	Guaro	570
Diabasa	Manacal	578
Serpentinita verdosa	Manacal	552

* $P_{refract}$ – presión refractada a la roca

Las componentes tienen un comportamiento decreciente en forma de exponencial cuando aumenta el radio relativo $\bar{r}$ (Figura 9), con valores ostensiblemente bajos en el caso de las argilitas, lo que confirma la certeza de la modelación matemática.

Conocidos los valores obtenidos mediante la modelación del campo tensional se obtuvieron los valores de los radios de agrietamiento y de descostramiento para las diferentes litologías objeto de investigación por las expresiones de cálculo (35) y (36), tal como se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de las componentes radiales, tangenciales y al cortante de la onda de tensiones generada por la detonación de una tira de cordón detonante de alto gramaje de pentrita en argilitas

r , m	$\bar{R}$	σ_{radmax},MPa	σ_{tmax},MPa	$\sigma_{cortmax}$,MPa
0,018	5,0	63	11	26,2
0,022	6,0	52	9	21,4
0,025	7,0	44	8	18,1
0,029	8,0	38	7	15,6
0,033	9,0	33	6	13,7
0,036	10,0	30	5	12,2
0,073	20,0	14	2	5,7
0,109	30,0	9	2	3,7
0,145	40,0	6	1,09	2,7
0,182	50,0	5	0,85	2,1
0,218	60,0	4	0,69	1,7
0,255	70,0	3	0,58	1,5
0,291	80,0	3	0,49	1,3
0,327	90,0	2,64	0,43	1,1
0,356	98,0	2,40	0,39	1,0
0,400	110,0	2,12	0,34	0,9

r- radio absoluto; $\bar{R}$ - radio relativo; σ_{radmax} - componente radial del campo de tensiones; σ_{tmax} - componente tangencial del campo de tensiones; $\sigma_{cortmax}$ - componente al cortante del campo de tensiones.

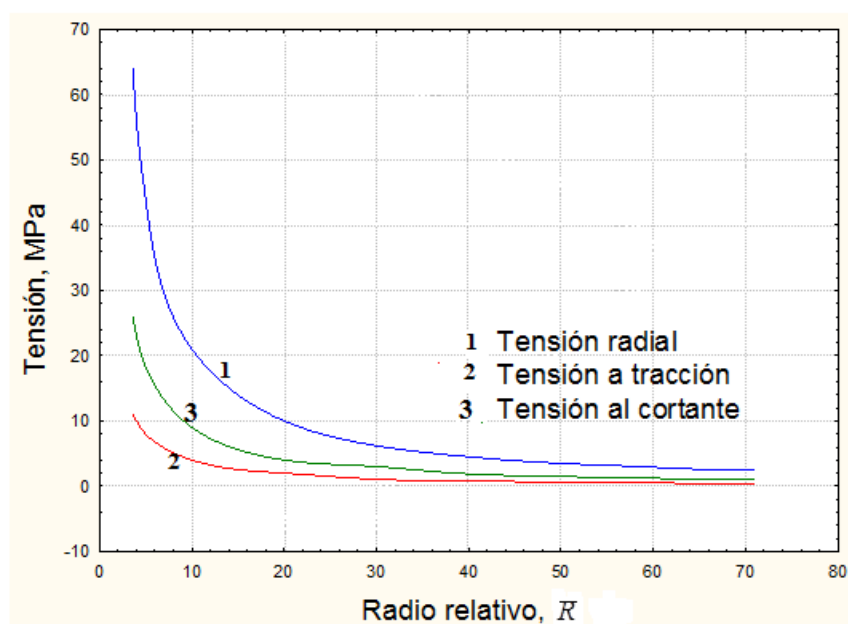


Figura 9. Curvas de extinción de las componentes radiales, tangenciales y al cortante del campo de tensiones producidas por una carga de cordón detonante de alto gramaje en argilita.

De forma análoga fueron realizados los cálculos para las restantes litologías. En la Tabla 4 se presentan los valores del radio de agrietamiento y descostramiento obtenidos a partir de los criterios de agrietamiento y descostramiento, expresiones de cálculo (35) y (36) para las diferentes litologías por las que se excavan los túneles del Traspase Este-Oeste, tanto con cordón sencillo como con cordón doble.

Tabla 4. Radios de agrietamiento y descostramiento producidos por cargas de cordón detonante de alto gramaje en diferentes litologías

Litologías	$R_{\text{agrietamiento}}, \text{m}$		$R_{\text{descostramiento}}, \text{m}$
	Cordón sencillo	Cordón doble	
Argilitas	0,2558	---	0,6989
Aleurolitas Buenaventura	---	0,5150	1,2108
Aleurolitas Castellanos	0,1254	---	0,2491
Caliza masiva	---	0,3790	0,6643
Calizas blanco-crema	---	0,3549	0,5660
Calizas margosas	---	0,4239	0,6981
Gabro	---	0,1909	0,2807
Diabasa	---	0,6955	0,9345
Serpentinita pardo verdosa	0,2558	---	0,6989

Con el valor del radio de agrietamiento (Tabla 4) y las características del agrietamiento señaladas en las condiciones ingeniero-geológicas se determinó la distancia entre barrenos de contorno según el criterio propuesto de corte por la línea de unión de los barrenos de contorno y determinado por la expresión de cálculo (14).

Este parámetro también se determinó según las expresiones de cálculo de Langefors y Kihlström (1976) (1), Baron y Kliuchnikov (1967), Gustafson (1976) (valores obtenidos de la Tabla 1) y las expresiones cálculo de Noskov, Komashenko y Zhavin (1980) (2), (3) y (4), las cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valor de la distancia entre barrenos determinado según el criterio propuesto por diferentes investigadores

Criterio de diseño	Distancia entre barrenos, m
Acción de la explosión sobre el medio (método propuesto)	0,50
Según Langefors y Kihlström	0,85
Según Baron y Kliuchnikov	0,65
Según Gustafson	0,55
Según Noskov, Komashenko y Zhavin	0,63
Según López-Jimeno, López-Jimeno y García-Bermúdez	0,63

La distancia entre barrenos, determinada por el método de la acción de la explosión sobre el medio rocoso, es decir, el método que se propone, resulta menor que por las expresiones empíricas propuestas por investigadores como Langefors y Kihlström; Baron y Kliuchnikov; Gustafson; Noskov, Komashenko y Zhavin; López-Jimeno, López-Jimeno y García-Bermúdez, por lo que se confirma la validez de la hipótesis propuesta de que estas expresiones solo son válidas para las condiciones en que fueron creadas. Sin embargo, el método de la acción de la explosión sobre el medio considera factores que lo acercan más a las condiciones en que se realiza la voladura y, por lo tanto, permite un ajuste más rápido de los pasaportes de voladura y obtener más eficiencia y eficacia de las mismas.

4. CONCLUSIONES

- En la litología argilita las voladuras experimentales a escala industrial diseñadas, según el criterio de corte por la línea de unión, basado en la acción física de la explosión sobre el medio rocoso pseudoplástico

permitió reducir la sobreexcavación como promedio hasta un 3-4 %, mientras que con el diseño propuesto por los autores anteriormente mencionados la sobreexcavación era del 13 %-15 %.

- El diseño de voladuras de contorno por recorte mediante este criterio permite, además, obtener contornos más sanos, estables y seguros debido a que se reduce el daño (las fisuras) en las rocas cercanas al contorno del túnel.
- La obtención de contornos más regulares y menos rugosos posibilita, a su vez, reducir los consumos de hormigón lanzado para el revestimiento de los túneles en un 3,69 %.
- El diseño de voladuras basado en la acción de la explosión sobre el medio rocoso permite, igualmente, un ajuste más rápido y preciso de los patrones en las voladuras de contorno por recorte.

5. REFERENCIAS

- Azarcovich, A. F.; Shuifer, M. I. y Tijomirov, A. P. 1984: *Trabajos de voladura cerca de objetos a proteger*. Moscú: Nedra. 120 p.
- Baron, L. I. y Klyuchnikov, A. V. 1967: *Smooth-Wall Blasting in Tunneling*. Leningrad: Nauka.
- Borovikov, A. E. y Vanyaguin, I. F. 1974: *Física de la fragmentación por voladura*. San Petersburgo: Instituto de Minas de San Petersburgo. 60 p.
- Borovikov, V. y Vanyaguin, I. F. 1984: *Modelación física de la acción de la explosión y del proceso de fragmentación de las rocas por voladura*. San Petersburgo: Instituto de Minas de San Petersburgo. 106 p.
- Borovikov, V. y Vanyaguin, I. F. 1995: *Modelling the effects of blasting on rock breakage*. CRC Press. 250 p. ISBN: 90-541-0222-5.
- Capote, M. 2011: *Aplicación de patrones de voladura en túneles hidrotécnicos, diseñados por el método de la acción física de la explosión sobre el medio rocoso*. Trabajo de diploma. Universidad de Holguín. 80 p.
- Langefors, U. y Kihlström, B. 1976: *Técnica moderna de voladura de rocas*. Bilbao: Urmo. 425 p.
- Lijin, P. A.; Zilbersmith, V. G. y Pravin, A. B. 1973: *El conjunto de barrenos en el laboreo de excavaciones mineras*. Moscú: Nedra. 144 p.
- López-Jimeno, C.; López-Jimeno, E. y García-Bermúdez, P. 2003: *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. 570 p.

- Matveichuk, V. V. y Chursalov, V. P. 2002: *Trabajos de voladura*. Akademicheskoy Proyeckt. Serie Gaudeamus. 376 p. ISBN: 5-8291-0261-7.
- Noskov, V. F.; Komashenko, V. I. y Zhavin, N. I. 1980: *Trabajos de perforación y voladura en las explotaciones subterráneas y a cielo abierto*. Moscú: Nedra. 320 p.
- Panin, I. M. y Kovaliev, I. A. 1984: *Cuaderno de tareas de clases prácticas de explotación subterránea de los yacimientos meníferos*. Moscú: Nedra. 200 p.
- Sargentón, G. 1997: *Perfeccionamiento de los trabajos de perforación y voladura en la excavación de túneles en Cuba Oriental*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 101 p.
- Sargentón, G. y Batista, J. 2005: Mecanismo de rotura de las rocas en el cuele en cuña. *Minería y Geología* 21(4).
- Sargentón, G. y Otaño, J. 2007: Criterio de triturabilidad para la proyección de los cueles rectos triturantes con taladros de compensación. *Minería y Geología* 23(4).
- Sargentón, G. 2009: *Criterios para el diseño de voladuras en el laboreo de excavaciones subterráneas*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 100 p.
- Sargentón, G. M.; Dieguez, Y. y Palacios, G. 2011: Diseño de voladuras de contorno con cordón detonante en túneles hidrotécnicos laboreados por rocas plásticas, mediante la acción física de la explosión sobre el medio. En: Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales. Instituto Superior Minero-Metalúrgico. Memorias. 11-13 noviembre, Moa, Cuba.

Recibido: 24/11/17

Aceptado: 10/09/18

Gilberto Sargentón-Romero, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Universidad de Holguín, Cuba gsr@uho.edu.cu