

Campo tenso - deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles

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

Resumen

En este artículo se determina el campo tenso - deformacional que se produce en el macizo rocoso del túnel Buenaventura - Sabanilla del Tránsito Este - Oeste (Holguín) al explosionar cargas de cordón detonante de 40 g/m. El cálculo se hizo para una distribución con espacio anular de aire entre la sustancia explosiva y la cámara de carga, empleando para ello el principio de la esencia física de la acción de la explosión sobre el medio. Para la obtención de los resultados se evaluó el agrietamiento en el frente de la excavación y se determinaron las propiedades físico - mecánicas de las rocas. Estos valores permitieron determinar los radios de trituración, agrietamiento y descostramiento para un macizo pseudoplástico, parámetros de partida para el diseño de voladuras efectivas en el laboreo de túneles.

Palabras clave

Campo tenso-deformacional; túneles; cordón detonante; diseño de voladuras.

Stress-strain field for explosions with detonating cord in tunneling

Abstract

In this article it is determined the stress-strain field produced in the rock mass of Buenaventura– Sabanilla tunnel after the explosion of the load detonating cord of 40 g/m. The calculation was carried out for a distribution with annular air space between the explosive substance and the load chamber, using the principle of the physical essence for the action of the explosion on the medium. The results were obtained studying the cracks produced in the front of the excavation, and determining the physical-mechanical properties of the rocks. With these values the trituration, cracking and decrustation radii were determined as initial parameters for the explosion design in tunneling.

Keywords

Stress-strain field; explosion in tunnels; detonating cord; explosion design.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el diseño de voladuras para el laboreo de excavaciones subterráneas se realiza por analogía, tomando como referencia los resultados prácticos obtenidos por métodos empíricos en diferentes condiciones.

Es de vital importancia que durante el proceso de fragmentación de rocas se tenga en cuenta la interacción macizo de rocas-sustancia explosiva, por lo que el estudio de este proceso debe incluir la modelación de la esencia física de la acción de la explosión de una sustancia explosiva en el medio circundante, una vez realizada la explosión, con el fin de garantizar diseños más racionales.

En la provincia de Holguín se construye actualmente el Trasvase Este-Oeste (TEO), obra de ingeniería que permitirá trasvasar agua a regiones más áridas. El TEO se compone de canales, túneles y presas; en los túneles hidrotécnicos el arranque de las rocas se realiza mediante perforación y explosión. Para el cálculo y diseño de los patrones de voladura el comportamiento del macizo, ante la acción de una sustancia explosiva, no se considera como un sistema, esto implica que los resultados difieran de una litología a otra, lo que trae consigo inestabilidad y gasto excesivo de recursos (Diéguez-García 2012).

El empleo de cordón detonante de alto gramaje (40 g/m) se emplea desde hace algunos años como alternativa para realizar voladuras de contorno efectivas durante la excavación de túneles, sin embargo, se realiza de manera empírica. Esto condujo a realizar una investigación con el objetivo de determinar el campo tenso-deformacional que se produce en el macizo rocoso al explotar cargas de cordón detonante de alto gramaje con espacio anular de aire, bajo el principio de la esencia física de la acción de la explosión sobre el medio, para poder diseñar voladuras más eficaces.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características del cordón detonante

El estudio analítico del estado tenso-deformacional del macizo al explotar cargas con espacio anular de aire en el túnel Buenaventura-Sabanilla, perteneciente al TEO, se acometió utilizando como sustancia explosiva el cordón detonante de 40 g/m, cuyas características técnicas se recogen en la Tabla 1 (ULAEX 1999)

Tabla 1. Características técnicas del cordón detonante de 40 g/m

| | |
|--|-------|
| Densidad de la sustancia explosiva, ρ_{se} (kg/m ³) | 1 620 |
| Velocidad de detonación, Vd (m/s) | 6 500 |
| Calor de explosión, Q (kcal/kg) | 740 |
| Diámetro, d (mm) | 8,10 |
| Índice de la adiabática de los productos de la explosión, k | 3,35 |

2.2. Determinación de las propiedades físico-mecánicas

Para determinar las características físico-mecánicas de las rocas que componen el macizo del túnel se consideraron las siguientes propiedades (Pedro-Alexandre *et al.* 2006):

- Densidad (ρ_0): se determinó por el método picnométrico.
- Masa volumétrica (ρ): se determinó por el método de la pesada hidrostática.
- Resistencia a compresión simple estática [σ_c^e]: se determinó en muestras cilíndricas de 50 mm de diámetro y 50 mm de altura.
- Resistencia a tracción estática [σ_t^e]: se determinó por el método de flexión, utilizando muestras alargadas con sección transversal rectangular de 35 x 35 mm y longitud de 315 mm.
- Velocidad de las ondas elásticas longitudinales (V_L): Se determinó en una varilla larga y fina y en muestras volumétricas (macizo) por medio del equipo de ultrasonido UK - 14 P.

La sección trasversal de las muestras en varillas (V_L^v) se tomaron de 4 x 4 mm, con longitud entre 80-120 mm; mientras que las sección trasversal de las muestras volumétricas (V_L^m) fueron de 50 x 50 mm y longitud de más de 10 cm. Teniendo ambas velocidades (V_L^m) y (V_L^v) se calculó el coeficiente de Poisson (μ).

$$\frac{V_L^v}{V_L^m} = \sqrt{\frac{1-\mu-2\mu^2}{1-\mu}} \quad (1)$$

Donde:

g - Aceleración de la gravedad, m/s^2 .

Con la velocidad de las ondas en las varillas se calculó el módulo de Young (E).

$$E = \frac{(V_L^v)^2 * \rho}{g}, \quad \text{MPa} \quad (2)$$

Con el módulo Young y el coeficiente de Poisson calculados, y la masa volumétrica de las rocas, se determinó la velocidad de las ondas transversales (Otaño 1998).

$$V_t = \sqrt{\frac{E * g * 1}{\rho * 2(1+\mu)}}, \quad \text{m/s} \quad (3)$$

A partir de los resultados anteriores se determinó:

- Límite de resistencia a compresión dinámica ante cargas explosivas $[\sigma_c^d]$:

$$[\sigma_c^d] = k_{dc} [\sigma_c^e] \quad (4)$$

Donde:

k_{dc} : Coeficiente de dinamicidad para la resistencia a compresión

$$k_{dc} = 16.38 - 0.9 \times 10^{-11} \rho_0 V_L^2 \quad (5)$$

- Límite de resistencia a tracción dinámica ante cargas explosivas $[\sigma_t^d]$.

$$[\sigma_t^d] = k_{dt} [\sigma_t^e] \quad (6)$$

Donde:

k_{dt} : Coeficiente de dinamicidad para la resistencia a tracción

$$k_{dt} = 3.44 - 0.2 \times 10^{-10} \rho_0 V_L^2 \quad (7)$$

- Límite de resistencia a cortante dinámico ante cargas explosivas $[\sigma_{cor}^d]$

$$[\sigma_{cor}^d] = [\sigma_{cor}^o] + \frac{\varphi P_0}{1 + \varphi P_0 / \{[\sigma_{cor}^{hi}] - [\sigma_{cor}^o]\}} \quad (8)$$

Donde:

$[\sigma_{cor}^o]$ - Límite de resistencia a cortante de las rocas a presión atmosférica, Pa;

$[\sigma_{cor}^{hi}]$ - Límite de resistencia a cortante de las rocas a presión hidrostática, Pa;

φ - Coeficiente de fricción interna;

P_0 - Presión pseudoestática de los productos de la explosión, Pa;

$$P_0 = 13.7 k_r (\rho_0 v_f^2)^{0.73} \quad (9)$$

Y donde Kr es un coeficiente de recálculo de la presión inicial de los productos de la explosión; se determina de la siguiente forma:

$$k_r = \frac{\rho_{se} V_{dse}^2}{\rho_T V_{dT}^2} \quad (10)$$

Donde:

ρ_T y V_{dT} - Son la densidad y velocidad de detonación de la sustancia explosiva patrón.

2.3. Estudio de agrietamiento

Para el estudio de agrietamiento se siguieron las etapas propuestas por otros investigadores (Kazikaev 1981; Hoek 2007a; 2007b; 2007c; Hoek *et al.* 2008). El estudio de agrietamiento permite caracterizar la estructura de las rocas para investigar el mecanismo de fragmentación

por voladura e incluye los parámetros siguientes: orientación de las grietas en el espacio (ángulo de buzamiento y acimut del buzamiento); intensidad del agrietamiento: contiene abertura y distancia entre las grietas en los sistemas (fractura del macizo) y extensión de las grietas (su persistencia); indicadores de calidad del agrietamiento: material de relleno y volumen total de la cavidad de las grietas (Kalichenko *et al.* 2000).

En el estudio de agrietamiento se utilizó una brújula para medir acimut, buzamiento, abertura, espaciamiento y relleno de las grietas en el frente de la obra.

2.4. Descripción del modelo matemático

La descripción cualitativa y cuantitativa del modelo matemático se realizó a partir del campo tenso-deformacional.

2.4.1. 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 según la isentrópica:

$$p = p_{\max} \left(\frac{V_0}{V} \right)^k, \text{ Pa} \quad (11)$$

Donde:

p - Presión media a lo largo del barreno, Pa;

V_0 - Volumen ocupado por los productos de la explosión en el momento de la detonación completa de la sustancia explosiva, m³;

V - Volumen de los productos de la explosión en el momento correspondiente a la presión P , m³;

k - Índice de la adiabática de los productos de la explosión, $k=f(p_{SE})$; se determina interpolando los valores que se muestran en la Tabla 2.

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

Tabla 2. Índice de la adiabática de los productos de la explosión

| $\rho_{se}(\text{g/cm}^3)$ | 0,1 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1,0 | 1,25 | 1,75 |
|----------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|------|
| k | 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:

$$P_{\max} = \frac{\rho_{se} (v_d)^2}{k + 1}, \text{ Pa} \quad (12)$$

Donde:

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

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

Una vez obtenida la presión media en el barreno se determinó la presión máxima (Pr) en el frente de las ondas refractadas en la pared del barreno, considerando la relación entre la resistencia de onda de la sustancia explosiva $\rho_{se}v_d$ y la resistencia de onda de la roca $\rho_o v_L$.

Si $\rho_o v_L < \rho_{se} v_d$

$$\left\{ \frac{\text{Pr}}{\rho_o} \left[1 - \frac{1}{\left(A \frac{\text{Pr}}{\rho_o v_L^2} + 1 \right)^{1/m}} \right] \right\}^{1/2} = v + \frac{2k v_d}{k^2 - 1} \left[1 - \left(\frac{\text{Pr}}{p} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right], \text{ Pa} \quad (14)$$

Donde:

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

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

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

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

La velocidad de los productos de la explosión:

$$v = \frac{v_d}{k + 1}, \text{ m/s} \quad (15)$$

Los coeficientes empíricos A y m se determinan de la siguiente forma:

$$\text{Si } \frac{\text{Pr}^{[1]}}{\rho_o(v_L)^2} < 0,1 \quad \text{entonces } A = 3 \text{ y } m = 3.$$

$$\text{Si } 0,1 \leq \frac{\text{Pr}^{[1]}}{\rho_o(v_L)^2} \leq 35 \quad \text{entonces } A = 5,5 \text{ y } m = 5.$$

Con la presión máxima (Pr) se determinó 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 & Vaniaguin 1974):

$$\rho_R = \rho_o \left[1 + \frac{A Pr}{\rho_o v_L^2} \right]^{1/m}, \quad \text{kg/m}^3 \quad (16)$$

$$v_R = \sqrt{\text{Pr} \left(\frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_R} \right)}, \quad \text{m/s} \quad (17)$$

$$v_F = \left[\frac{\text{Pr}}{\rho_o} \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho_o}{\rho_R}} \right) \right]^{1/2}, \quad \text{m/s} \quad (18)$$

2. 4.2. 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 & Vaniaguin 1974):

$$\sigma_{r \max} = \frac{\text{Pr}}{\left(\bar{r}\right)^{1,08}}, \quad \text{MPa} \quad (19)$$

Donde:

Pr - Presión máxima en el frente de las ondas refractadas a la pared del barreno, MPa;

\bar{r} - Distancia relativa del punto considerado del macizo al centro de la carga, m;

$$\bar{r} = \frac{r}{R_c^e} \quad (20)$$

Donde:

r - Distancia del punto considerado del macizo al centro de la carga, m;

R_c^e - Radio de carga equivalente;

$$R_c^e = R_c \left(\frac{\rho_{se} Q_{se}}{\rho_p Q_p} \right)^\lambda, \text{ m} \quad (21)$$

Donde:

R_c - radio de la carga de sustancia explosiva utilizada, m;

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 ($Q_p = 5950 \text{ kJ/kg}$);

λ - índice que tiene en cuenta la forma de construcción de la carga;

$\lambda = 1/2$ para cargas cilíndricas.

Se determina la máxima amplitud de la componente tangencial de estas ondas.

$$\sigma_{tmax} = (C_1 + C_2 \bar{r}) \sigma_{rmax}, \text{ Mpa} \quad (22)$$

Donde:

C_1 y C_2 - son magnitudes adimensionales que dependen de la dureza acústica de las rocas;

$$C_1 = 0,09 + 0,228 * 10^{-7} \rho_o v_L \quad (23)$$

$$C_2 = (0,07 - 0,224 * 10^{-7} \rho_o v_L) * 10^{-2} \quad (24)$$

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

$$\sigma_{cor max} = \frac{\sigma_{r max} - \sigma_{t max}}{2}, \text{ MPa} \quad (25)$$

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.

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 (Figura 1) los radios relativos de trituración ($\bar{R}t$), agrietamiento ($\bar{R}g$) y descostramiento ($\bar{R}d$) respectivamente (Otaño 1998).

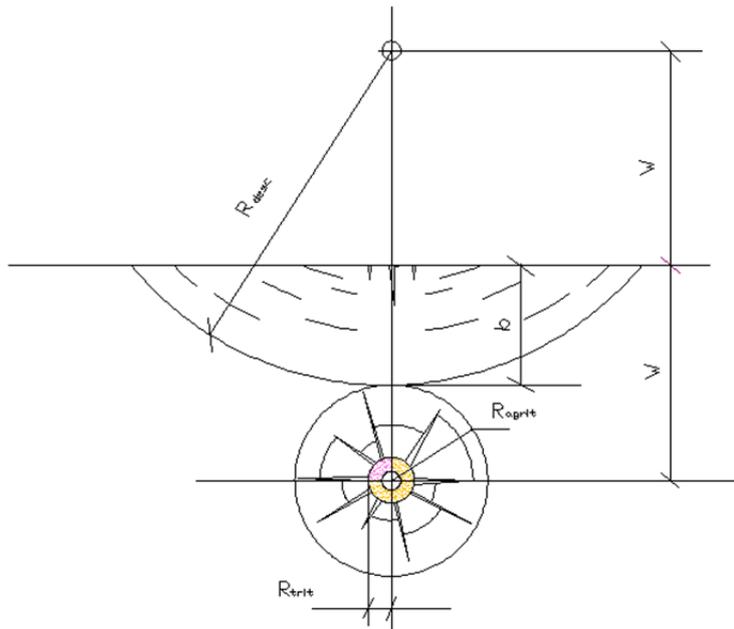


Figura 1. Representación de los radios de trituración, agrietamiento y descostramiento después de hacer explosión la carga de sustancia explosiva.

Con los radios relativos se determinan los radios de trituración ($\dot{R}t$), agrietamiento ($\dot{R}g$) y descostramiento ($\dot{R}d$) para un macizo monolítico.

$$\dot{R}t = \bar{R}t * R_c^e, \text{ m} \quad (26)$$

$$\dot{R}g = \bar{R}g * R_c^e, \text{ m} \quad (27)$$

$$\dot{R}d = \bar{R}d * R_c^e, \text{ m} \quad (28)$$

La semisuma de estos dos últimos radios determina la línea de menor resistencia máxima (W_{max}), indicador sobre el cual se establecen los parámetros de la voladura.

$$\dot{R}g + \dot{R}d = 2W_{max}, \text{ m} \quad (29)$$

Donde:

W_{max} - línea de menor resistencia para el macizo monolítico, m;

Por lo que:

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

Los radios se calcularon para un macizo monolítico, por lo que posteriormente 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 $\sum \delta_g$.

$$K_{db} = \left\{ 1 - 0,2 \left(\sum \bar{\delta}_g \right) - 0,12 \left(\sum \delta_g \right)^2 \right\} \gamma_r \quad (31)$$

Donde:

δ_g - abertura de las grietas, m;

$$\sum \bar{\delta}_g = \frac{\sum \delta_g}{R_c^e}, \text{ m} \quad (32)$$

γ_r - Coeficiente que depende del material que rellena las grietas

$$\gamma_r = 0,81 * \rho_o V_L * 10^{-7} \frac{(12,1 * 10^6 + \rho_{re} V_{re})^3 (\rho_o V_L - \rho_{re} V_{re})}{(\rho_o V_L + \rho_{re} V_{re})^3 (12,1 * 10^6 - \rho_{re} V_{re})} \quad (33)$$

A continuación aparecen los radios de trituración (Rt), agrietamiento (Rg), descostramiento (Rd) y línea de menor resistencia (W) considerando el agrietamiento.

$$Rt = \dot{R}t * \gamma_r, \text{ m} \quad (34)$$

$$Rg = \dot{R}g * \gamma_r, \text{ m} \quad (35)$$

$$Rd = \dot{R}d * \gamma_r, \text{ m} \quad (36)$$

$$W = \frac{Rg+Rd}{2}, m \quad (37)$$

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades físico-mecánicas

La roca que compone el túnel objeto de estudio es pseudoplástica, con bajos valores de resistencia a la tracción, como revelan los datos de la Tabla 3. Los límites de resistencia dinámica se emplearon para establecer los radios relativos de trituración, agrietamiento y descostramiento.

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

| ρ_o (kg/m ³) | ρ (kg/m ³) | $[\sigma_c^e]$ MPa) | $[\sigma_t^e]$ (MPa) | V_l (m/s) | V_t (m/s) |
|----------------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 2 715 | 1 600 | 3,50 | 0,35 | 1 373 | 867 |
| E (Mpa) | μ | Kdc | Kdt | $[\sigma_c^d]$ Mpa | $[\sigma_t^d]$ MPa |
| 307 | 0,25 | 16,33 | 3,33 | 57,16 | 1,16 |
| $[\sigma_{cor}^o]$ | $[\sigma_{cor}^{hi}]$ | φ | Po | Kr | $[\sigma_{cort}^d]$ MPa |
| 0,80 | 13,72 | 0,20 | 1,16 | 0,89 | 12,92 |

3.3. Agrietamiento en el frente del túnel

En el tramo de túnel analizado hay una sola grieta principal, con dirección este-oeste (E-O) y una caída leve en el eje de avance, visualizándose en el macizo la unión de dos bloques horizontales en la parte superior del túnel, con un ángulo de buzamiento pequeño (5° a 8°), de derecha a izquierda. El túnel tiene dirección de 250° con respecto al norte.

El agrietamiento es bastante regular, con un espesor pequeño, que oscila entre 1 y 2 mm; el material es una semi-roca plástica, por lo que en su estado natural se presenta en forma compacta con pocas grietas finas o secundarias. En algunos casos la arcilla se encuentra rellenando las grietas. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones realizadas.

Tabla 4. Mediciones del agrietamiento

| Nº | Acimut (grado) | Buzamiento (grado) | Abertura (cm) | Espaciamiento (m) | Relleno |
|----|----------------|--------------------|---------------|-------------------|---------|
| 1 | 250 | 5 | 0,1 | 0,0 | ... |
| 2 | 250 | 5 | 0,1 | 0,5 | Arcilla |
| 3 | 250 | 5 | 0,1 | 0,7 | ... |
| 4 | 253 | 6 | 0,2 | 0,6 | Arcilla |
| 5 | 250 | 5 | 0,1 | 0,5 | Arcilla |
| 6 | 255 | 7 | 0,1 | 0,5 | Arcilla |
| 7 | 253 | 6 | 0,2 | 0,8 | ... |
| 8 | 253 | 6 | 0,2 | 0,9 | Arcilla |
| 9 | 253 | 6 | 0,1 | 0,6 | Arcilla |
| 10 | 250 | 5 | 0,1 | 0,5 | Arcilla |
| 11 | 258 | 8 | 0,2 | 0,5 | ... |
| 12 | 255 | 7 | 0,2 | 0,6 | ... |
| 13 | 250 | 5 | 0,1 | 0,8 | Arcilla |

3.4. Campo tenso-deformacional

Tabla 5. Parámetros de las ondas de choque para cargas desacopladas con espacio anular con aire

| P _{max} (Mpa) | P (MPa) | V (m/s) | A | m | d _{SE} (m) |
|------------------------|---------|-----------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 15 741,72 | 0,25 | 1 494,94 | 3 | 3 | 0,0081 |
| d _b (m) | K | Pr (MPa) | ρ _R (kg/m ³) | V _R (m/s) | V _f (m/s) |
| 0,042 | 3,35 | 14 139,78 | 5 707,04 | 1 652,39 | 3 151,7 |

Obtenidos los parámetros principales de la onda refractada a la roca se realizó la modelación del campo tenso-deformacional, producido por la explosión de la carga desacoplada en el macizo rocoso, alrededor de la cámara de carga para la litología estudiada. En las Figuras 2, 3 y 4

se muestran los gráficos de extinción de las tensiones radiales, tangenciales y al cortante.

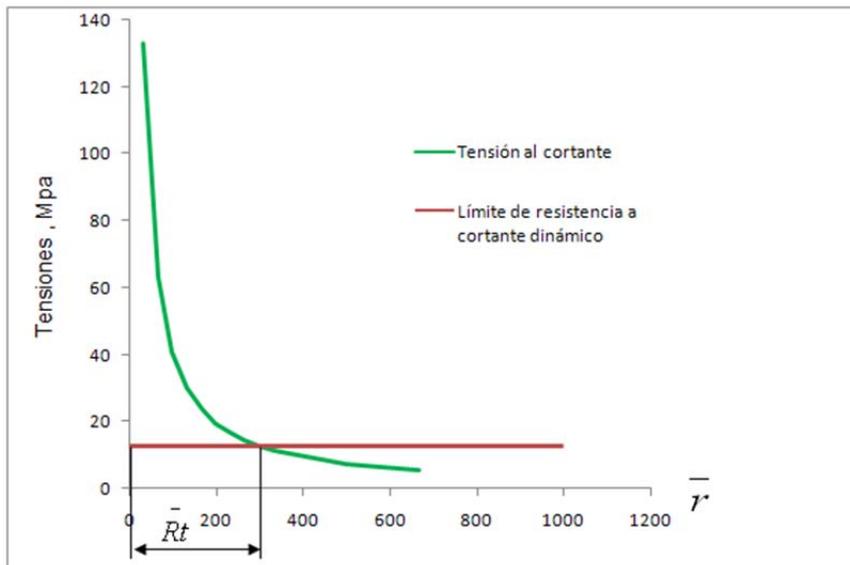


Figura 2. Curvas de extinción de las tensiones al cortante.

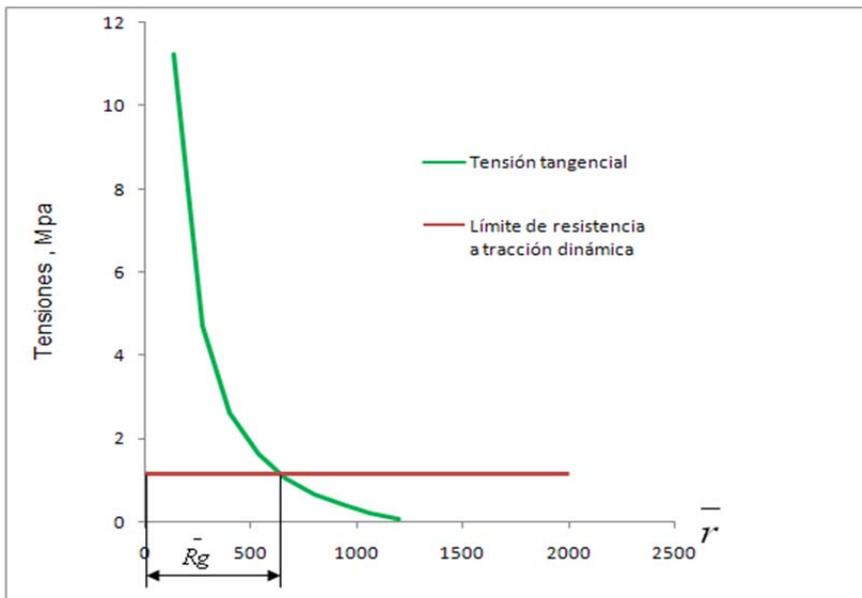


Figura 3. Curvas de extinción de las tensiones tangenciales.

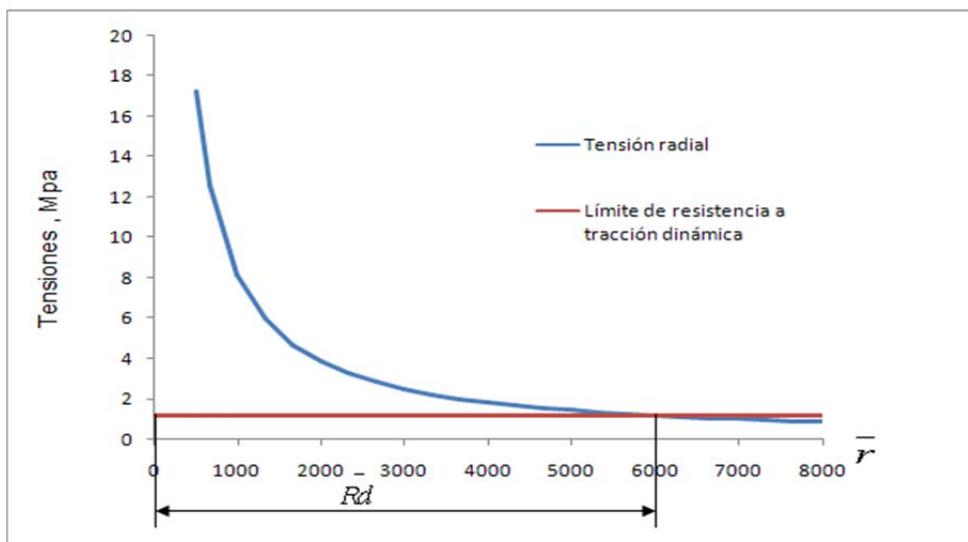


Figura 4. Curvas de extinción de las tensiones radiales.

Los gráficos anteriores muestran las curvas de extinción de las tensiones en función de la distancia relativa a la que se encuentra la onda en el macizo. Mediante el gráfico de la Figura 4 se determinó el radio de descostramiento, a partir del punto donde se cortan las tensiones radiales con el límite de resistencia a tracción dinámica de la roca.

Lo mismo sucede con los gráficos de las Figuras 2 y 3, el primero muestra las tensiones al cortante y el segundo las tensiones tangenciales; las cuales, al interceptar con el límite de resistencia a tracción dinámica y al cortante dinámico, determinan el radio de agrietamiento y descostramiento, respectivamente. En la Tabla 6 se resumen estos parámetros.

Tabla 6. Distancias relativas de las tensiones para un macizoseudoplástico monolítico

| \bar{R}_t | R_t^* (m) | \bar{R}_g | R_g^* (m) | \bar{R}_d | R_d^* (m) | W_{max} (m) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 300 | 0,89 | 600 | 1,79 | 6 000 | 17,99 | 9,89 |

Teniendo en cuenta que el macizo en el cual se realiza el estudio no es homogéneo, se debe 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. 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) | $\sum \bar{\delta}_g$ | κ_{db} |
|----------------------------------|----------------|------------|---------------------|-----------------------|---------------|
| 1 650 | 1 100 | 0,88 | 0,01 | 3,33 | 0,29 |

Tabla 8. Distancias límites de las tensiones para un macizoseudoplástico agrietado

| Rt , m | Rg, m | Rd, m | W, m |
|--------|-------|-------|------|
| 0,26 | 0,52 | 5,32 | 2,86 |

3. CONCLUSIONES

Se establece por primera vez el campo tenso-deformacional para voladuras, en macizosseudoplásticos, bajo el principio de la esencia física de la acción de la explosión sobre el medio cuando se explosionan cargas con cordón detonante de alto gramaje durante el laboreo de túneles. La obtención del campo tenso-deformacional permite realizar diseños argumentados bajo principios físico-matemáticos para obtener voladuras efectivas.

4. REFERENCIAS

- BOROVIKOV, V. A. & VANIAGUIN, I. F. 1974: *Física de la fragmentación explosiva*. Instituto de Minas de San Petersburgo, 60 p.
- DIÉGUEZ-GARCÍA Y. 2012: *Campo tenso-deformacional que se produce al explosionar cargas con cordón detonante durante el laboreo de túneles*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 63 p.
- HOEK, E. 2007a: Blasting damage in rock. En: *Practical Rock Engineering*. New 2007a. edition complete, 24 MB. (en soporte digital) Consulta: 15 mayo 2007. Disponible en: www.rocscience.com.
- HOEK, E 2007b: Structurally controlled stability in tunnels. En: *Practical Rock Engineering*. New 2007b. edition complete, 24 MB. (en soporte digital) Consulta: 15 mayo 2007. Disponible en: www.rocscience.com.
- HOEK, E 2007c: Shear strength of rock discontinuities. En: *Practical Rock Engineering*. New 2007c. edition complete, 24 MB. (en soporte digital) Consulta: 29 mayo 2007. Disponible en: www.rocscience.com.

- HOEK, E.; CARRANZA-TORRES C.; DIERICHS, S. Y CORKUM, B. 2008: Integration of geotechnical and structural design in tunnelling. Proceedings University of Minnesota. 56th Annual Geotechnical Engineering Conference. Minneapolis, 29 feb 2008, 1-53. (en soporte digital). Disponible en: www.roscience.com. Consulta: 12 marzo 2008.
- KAZIKAEV, D. M. 1981: *Procesos geomecánicos en la explotación conjunta y ulterior de las menas*. Nedra, Moscú, 89 p.
- KALICHENKO, V. M; STIEPIN, N. I; TUPIKLIN, I. I Y USHAKOV, I. N. 2000: *Geometría del subsuelo*. Novocherkask, YRGU, 78 p.
- OTAÑO-NOGUEL, J. 1998: Acción de la explosión en las rocas ligadas. Diplomado de voladuras, módulo 3, UNL, Loja, Ecuador.
- PEDRO-ALEXANDRE, A.; JOE-BOY, S. & OTAÑO NOGUEL, J. 2006. Análisis del diseño de voladuras con cargas compactas en la cantera de áridos El Cacao. *Minería y Geología* 22(4).
- ULAEX, S. A. 1999. *Unión Latinoamericana de Explosivos*, S. A. Editorial SI-MAR S.A., 32 p.

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

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

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