

# ANÁLISIS DEL DISEÑO DE VOLADURAS CON CARGAS COMPACTAS EN LA CANTERA DE ÁRIDOS EL CACAO

## Design analysis of blasting using compact loads in Cacao quarry

Antonio M. PEDRO-ALEXANDRE<sup>1</sup>, Seidu Amadu JOE – BOY<sup>1</sup>, José OTAÑO-NOGUEL<sup>1</sup>

(1) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Email: [aalexandre@ismm.edu.cu](mailto:aalexandre@ismm.edu.cu)

**RESUMEN-** Durante las voladuras primarias en la cantera de áridos El Cacao se obtiene un alto porcentaje de pedazos con dimensiones superiores a los admitidos por los eslabones siguientes de la cadena tecnológica, lo que provoca la necesidad de la fragmentación secundaria, trayendo esto aparejado numerosos inconvenientes, el encarecimiento de las labores y el incremento del costo de producción. Para un diseño racional de las voladuras se requiere conocer las propiedades físicas de las rocas así como la acción de la explosión en el medio. En el presente trabajo se determinan esas propiedades y se ofrecen los resultados del estudio de la acción de la explosión en el medio provocado por la detonación de una carga compacta de sustancia explosiva.

**Palabras clave:** Voladuras, diseño, carga compacta

**ABSTRACT-** In the laboured of the quarry of arid The Cacao is faced a problem in the primary explosions, obtaining of a high percentage of pieces with superior dimensions to those admitted by the subsequent links of the technological chain, it causes the necessity of the secondary fragmentation, which brings about numerous inconveniences and the rise in the price of all the works and the increase of the production cost. For a rational design of the explosions is required to know the physical properties of rocks as well as the action of the explosion in the medium. In this work are specified the results of the study of the action of the explosion in the medium caused by the detonation of a compact load of explosive substance.

**Palabras clave:** Blastings, design, compact loads

## INTRODUCCIÓN

El yacimiento de calizas El Cacao se ubica en el municipio Jiguaní, provincia Granma, a un kilómetro y medio del poblado de Charco Redondo. El yacimiento está formado por calizas

organógenas detríticas pelitomórficas de edad Eoceno medio pertenecientes a la formación Charco Redondo.

En la explotación de la cantera, al realizar las voladuras, se obtiene una producción excesiva de rocas con granulometría que no responde a los requisitos establecidos y lleva a la elevación de los costos (Otaño, 1981, 1998). Con el objetivo de perfeccionar el diseño de los patrones de voladura se determinaron las propiedades físicas de las rocas del macizo y se realizó un estudio de la acción de la explosión en el medio provocado por la detonación de una carga compacta de sustancia explosiva.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinó: densidad ( $\rho_o$ ), masa volumétrica ( $\rho$ ), resistencia a compresión ( $\sigma_c$ ), resistencia a tracción ( $\sigma_t$ ) y velocidad de las ondas longitudinales ( $V_l$ ). Se calcularon: porosidad ( $P$ ), resistencia a cortante ( $\sigma_{cor}$ ), coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), módulo de Young ( $E$ ) y velocidad de las ondas transversales ( $V_t$ ).

Densidad ( $\rho_o$ ) – Para su determinación se utilizó el método picnométrico, con 10 muestras.

Masa volumétrica ( $\gamma_v$ ) – Se determinó por el método de la pesada hidrostática, con 10 muestras.

Porosidad total ( $P$ ) – Se calculó a partir de la densidad y la masa volumétrica obtenidos.

$$P = \frac{\rho_o - \gamma_v}{\rho_o} * 100 \quad \%$$

Resistencia a compresión ( $\sigma_c$ ) – Se determinó en muestras cúbicas de 3 x 3 x 3 cm en una prensa hidráulica PR - 60 con 10 muestras.

Resistencia a tracción ( $\sigma_t$ ) – Se determinó por el método de la flexión (Blanco, 1998). Se utilizaron 5 muestras rectangulares de 35 mm de alto, 35 mm de ancho y 315 mm de longitud.

$$\sigma_t = \frac{6Mf}{A * b * h^2}$$

Donde:

Mf – Momento flector de destrucción, Kg f / cm<sup>2</sup>

A – Coeficiente de flexión

b – Ancho de la muestra

h – Altura de la muestra

Se utilizó como valor del coeficiente de flexión A = 3,34

Resistencia a cortante ( $\sigma_{cor}$ ) – La resistencia a cortante se obtuvo a partir de las resistencias a compresión y tracción.

$$\tau = \sqrt{\frac{\sigma_c * \sigma_t}{3}}$$

Velocidad de las ondas longitudinales ( $V_L$ ) – Se determinó en muestras rectangulares con sección transversal 5 x 5 cm y longitud 12 cm. En el equipo UK – 14 P con transductores con frecuencia de operación de 76 KHz.

Coeficiente de Poisson: Para la determinación del coeficiente de Poisson se midió la velocidad de las ondas longitudinales en varillas con sección transversal 4 x 4 x 10 mm ( $V_L^v$ ) y con la velocidad medida anteriormente en las muestras de 5 x 5 x 12 cm ( $V_L^m$ ) se aplicó la fórmula (Xanukaev, 1974).

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

Módulo de Young ( $E$ ): Para la determinación del módulo de Young se utilizó la velocidad de las ondas longitudinales en las varillas de 4 x 4 x 10 mm (Xanukaev, 1974) y la masa volumétrica de la roca.

$$E = \frac{(V_L^v)^2 * \gamma_v}{g}$$

Velocidad de las ondas transversales ( $V_t$ ): La velocidad de las ondas transversales se determinó a partir de la conocida relación

$$V_t = \sqrt{\frac{E * g}{\gamma_v} * \frac{1}{2(1 + \mu)}}$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad

Los datos de las mediciones se sometieron a tratamiento estadístico, donde se determinó: media aritmética, desviación estándar teórica, coeficiente de variación y el índice de exactitud, para un valor de probabilidad:  $\gamma_r = 0,95$ .

También se determinó la presión de la onda refractada a la roca en la pared del barreno, la densidad y la velocidad de las partículas en el frente de la onda refractada, la velocidad del frente de esta onda, las curvas de extinción de las tensiones producidas por la explosión en el macizo de rocas y los radios de trituración, agrietamiento y descostramiento.

### Parámetros de las ondas de tensión explosiva en las rocas

Los parámetros de las ondas de choque en el límite carga - roca dependen fundamentalmente de las propiedades de las sustancias explosivas (tabla 1) y de las propiedades físicas (tabla 2) de las rocas que rodean la carga.

**TABLA 1.** Propiedades de las sustancias explosivas

<b>Amitrex – B</b>	Densidad de la sustancia explosiva, $\rho_{se}$ ( Kg / m <sup>3</sup> )	860
	Velocidad de detonación, Vd ( m / s )	3000
	Calor de explosión, Q ( Kcal / Kg )	701
	Peso por bolsa, q' ( Kg )	25
	Presión de detonación, Pd ( MPa )	1990
<hr/>		
<b>Amonita – R No.4</b>	Densidad de la sustancia explosiva, $\rho_{se}$ ( Kg / m <sup>3</sup> )	1000
	Velocidad de detonación, Vd ( m / s )	3700
	Calor de explosión, Q ( Kcal / Kg )	1030
	Peso del cartucho, q' ( g )	150
	Diámetro del cartucho, dc ( mm )	32
	Longitud del cartucho, lc ( mm )	150
	Presión de detonación, Pd ( MPa )	3422
<hr/>		
<b>Tectron –100</b>	Densidad de la sustancia explosiva, $\rho_{se}$ ( Kg / m <sup>3</sup> )	1150
	Velocidad de detonación, Vd ( m / s )	6200
	Calor de explosión, Q ( Kcal / Kg )	740
	Peso del cartucho, q' ( g )	4167
	Diámetro del cartucho, dc ( mm )	100
	Longitud del cartucho, lc ( mm )	460
	Presión de detonación, Pd ( Kbar )	104
<hr/>		
<b>DynoAnfo</b>	Densidad de la sustancia explosiva, $\rho_{se}$ ( Kg / m <sup>3</sup> )	820
	Velocidad de detonación, Vd ( m / s )	3600
	Calor de explosión, Q ( Kcal / Kg )	912
	Peso por bolsa, q' ( Kg )	25
	Presión de detonación, Pd ( Kbar )	21- 37

TABLA 2. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

$\rho_o$ Kg/m <sup>3</sup>	$\gamma_v$ Kg/m <sup>3</sup>	P %	$\sigma_c$ MPa	$\sigma_t$ MPa	$\sigma_{cor}$ MPa	$V_1^m$ m/s	$V_1^v$ m/s	'	E MPa	$V_t$ m/s
2660	2640	0,91	80,0	7,27	13,92	6495,03	6030,30	0,23	9,79	3847,12

### Parámetros de las ondas de choque para cargas compactas

Para valorar la presión en el frente de la onda de choque se utilizan las relaciones que se derivan de las condiciones de refracción de la onda de detonación a la roca a través de una superficie plana, es decir, de la condición de compatibilidad dinámica en los dos frentes de la ondas reflejada y refractada (Otaño, 1998).

El sistema de ecuaciones obtenido de estas condiciones se relaciona con la adiabática para las rocas, en la forma propuesta por V.M. Gogoliev (Vorobikov, 1974).

$$\frac{Pr}{\rho_o(v_L)^2} = \frac{1}{A} \left[ \left( \frac{Pr}{\rho_o} \right)^m - 1 \right]$$

Donde:

Pr Presión refractada a la roca en la pared del barreno

$\rho_o$  Densidad de la roca no alterada por la onda

$v_L$  Velocidad de las ondas longitudinales en la roca no alterada por la onda.

A, m Coeficientes adimensionales

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

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

### Presión en el frente de la onda de detonación

$$p = \frac{\rho_{se} (v_d)^2}{k + 1}$$

Donde:

$\rho_{se}$  – Densidad de la sustancia explosiva

$V_d$  – Velocidad de detonación

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

El índice de la adiabática ( k ) se determina a partir de la densidad de la sustancia explosiva, interpolando en la siguiente tabla:

**TABLA. 3** 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

Amitrex – B

K = 2,89

Amonita – R No.4

K= 3,0

Tectron 100

K= 3,12

DynoAnfo

K = 2,86

### Velocidad de los productos de la explosión

$$v = \frac{v_d}{k + 1}$$

### Valor inicial para Pr

$$Pr^{[1]} = k_R \cdot p$$

Donde:

$k_R$  es el coeficiente de refracción acústica de las ondas y se calcula por

$$k_R = \frac{2\rho_o v_L}{\rho_{se} v_d + \rho_o v_L}$$

### Presión máxima de la onda refractada

Se calcula en dependencia de la relación entre la impedancia de la sustancia explosiva  $\rho_{se} v_d$  y la resistencia de onda de la roca  $\rho_o v_L$ . En los cálculos realizados con el Amitrex B,

Amonita – R No. 4, Tectron 100 y DynoAnfo; la resistencia de onda de la roca ( $\rho_o v_L$ ) es

mayor que la impedancia de la sustancia ( $\rho_{se} v_d$ ). Por tanto utilizamos la siguiente ecuación.

$$F(Pr) = \left\{ \frac{Pr}{\rho_o} \left[ I - \frac{I}{\left( A \frac{Pr}{\rho_o v_L^2} + I \right)^{1/m}} \right] \right\}^{1/2} - v + \left\{ \frac{\sqrt{2k}(Pr-p)}{\rho_{se}(k+1)[Pr(k+1)-p(k-1)]^{1/2}} \right\}$$

Pr se puede determinar por uno de los métodos matemáticos de aproximación o bien grafoanalíticamente, en nuestro caso lo hallamos por el método de aproximaciones sucesivas de Newton.

### Densidad de la roca en el frente de la onda refractada

$$\rho_R = \rho_o \left[ I + \frac{A Pr}{\rho_o v_L^2} \right]^{1/m}$$

### Velocidad de las partículas

$$v_R = \sqrt{Pr \left( \frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_R} \right)}$$

### Velocidad del frente de onda

$$v_F = \left[ \frac{Pr}{\rho_o} \left( \frac{1}{1 - \frac{\rho_o}{\rho_R}} \right) \right]^{1/2}$$

### Cálculo del estado tensional en el macizo rocoso provocado por la detonación de una carga compacta de sustancia explosiva

La onda de compresión que se forma en la roca como resultado de la refracción de la onda de detonación y la acción de los productos de la explosión en su difusión posterior desde el eje (centro de la carga) por la roca, se extingue intensamente debido a las pérdidas por disipación en las zonas cercanas a la carga (Otaño, 1998).

A. N. Xanukaev, V. A. Borovikok e I. F. Vannagin(1974) demostraron experimentalmente que la máxima tensión en la onda para el caso de cargas compactas se amortigua con la distancia, aproximadamente de forma proporcional a la distancia  $\bar{r}$  elevada a  $n = 1,08$ .

**Máxima amplitud de la componente radial de las ondas de tensión**

$$\sigma_{r \max} = \frac{Pr}{(\bar{r})^{1,08}}$$

Donde:

$\bar{r}$  – Distancia relativa del eje de la carga.

**Cálculo de la distancia relativa del eje de la carga**

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

Donde:

r – Distancia natural del centro de la carga al punto del macizo donde se quiere calcular las tensiones.

$R_c^e$  – Radio de carga equivalente

**Cálculo del radio de carga equivalente.**

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

Donde:

$\lambda = I/2$  Para cargas cilíndricas.

$R_c$  Radio de carga

$Q_{se}$  Es el calor de la explosión de la sustancia explosiva utilizada.

$\rho_p, Q_p$  Densidad y calor de la explosión de la pentrita

( 1500 Kg/m<sup>3</sup> y 1421,13 Kcal/Kg )

**Máxima amplitud de la componente tangencial de las ondas de tensión**

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

$C_1$  y  $C_2$  - Son magnitudes adimensionales que dependen de la dureza acústica de las rocas.

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

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

**Máxima amplitud de la tensión a cortante**

$$\sigma_{cor\ max} = \frac{\sigma_{r\ max} - \sigma_{tt\ max}}{2}$$

**RESULTADOS****TABLA 4.** Parámetros de las ondas de choque para cargas compactas

Sustancia explosiva	P (MPa)	V (m/s)	Kr	Pr <sup>1</sup> (MPa)	A	m	Pr (MPa)	$\rho_R$ (Kg/m <sup>3</sup> )	V <sub>R</sub> (m/s)	V <sub>f</sub> (m/s)
Amitrex B	1990	771,208	1,740	3462	3	3	14100	3252	732,195	7240
Amonita R No.4	3423	925,00	1,647	5638	3	3	17538	3024	890,579	7403
Tectron 100	10730	1504,85	1,420	15236	5,5	5	32900	3223	1470,0	8413
DynoAnfo	2753	932,642	1,708	4703	3	3	17484	3036	888,135	7401

**TABLA 5.** Resultados del cálculo del estado tensional en el macizo rocoso provocado por la detonación de una carga compacta de Amitrex – B.

R <sub>c</sub> <sup>e</sup>	No.	r, m	$\frac{-}{r}$	$\sigma_{r\ max}$ , MPa	$\sigma_{t\ max}$ , MPa	$\sigma_{cor\ max}$ , MPa
0,031	1	0,0575	1,855	7234	3458	1888
	2	0,124	4	3155	1487	834
	3	0,248	8	1492	684,157	403,921
	4	0,372	12	963,171	429,45	266,861
	5	0,5	16,129	699,847	302,881	198,483
	6	1,0	32,258	331,048	126,345	102,352
	7	1,5	48,387	213,655	70,618	71,519
	8	2,0	64,516	156,595	43,752	56,421
	9	2,5	80,645	123,06	28,09	47,485
	10	3,0	96,774	101,065	17,902	41,581
	11	3,5	112,903	85,565	10,782	37,39 2
	12	4,0	129,032	74,074	5,547	34,264
	13	4,5	145,161	65,226	1,549	31,839
	14	5,0	161,29	58,211		
	15	6,0	193,548	47,807		
	16	7,0	225,806	40,475		
	17	8,0	258,065	35,039		
	18	9,0	290,323	30,854		
	19	10	322,581	27,535		

	20	11	354,839	24,842		
	21	12	387,097	22,614		

**TABLA 6.** Resultados del cálculo del estado tensional en el macizo rocoso provocado por la detonación de una carga compacta de Amonita – R No.4

$R_c^e$	No.	r, m	$\frac{r}{r}$	$\sigma_{r \max}$ , MPa	$\sigma_{t \max}$ , MPa	$\sigma_{cor \max}$ , MPa
0,04	1	0,0575	1,438	11850	5680	3085
	2	0,16	4	3924	1849	1038
	3	0,32	8	1856	851,07	502,465
	4	0,48	12	1198	534,153	331,923
	5	0,5	12,5	1146	509,151	318,424
	6	1,0	25	542,257	219,43	161,413
	7	1,5	37,5	349,966	127,75	111,108
	8	2,0	50	256,503	83,469	86,517
	9	2,5	62,5	201,572	57,606	71,983
	10	3,0	75	165,544	40,75	62,397
	11	3,5	87,5	140,156	28,947	55,605
	12	4,0	100	121,333	20,252	50,541
	13	4,5	112,5	106,84	13,599	46,621
	14	5,0	125	95,349	8,358	43,496
	15	6,0	150	78,307		
	16	7,0	175	66,298		
	17	8,0	200	57,394		
	18	9,0	225	50,539		
	19	10	250	45,103		
	20	11	265	40,691		
	21	12	300	37,042		
	22	13	325	33,974		
	23	14	350	31,361		
	24	15	375	29,109		
	25	16	400	27,15		
	26	17	425			

**TABLA 7.** Resultados del cálculo del estado tensional en el macizo rocoso provocado por la detonación de una carga compacta de Tectron 100.

$R_c^e$	No.	r, m	$\frac{r}{r_0}$	$\sigma_{r \max}$ , MPa	$\sigma_{t \max}$ , MPa	$\sigma_{cor \max}$ , MPa
0,036	1	0,0575	1,597	19840	9500	5170
	2	0,136	4	7362	3469	1947
	3	0,272	8	3482	1597	942,5
	4	0,408	12	2247	1002	622,5
	5	0,5	13,889	1919	844,134	537,433
	6	1,0	27,778	907,818	359,364	274,227
	7	1,5	41,667	585,896	206,134	189,881
	8	2,0	55,556	429,424	132,176	148,624
	9	2,5	69,444	337,466	89,014	124,226
	10	3,0	83,333	277,149	60,902	108,124
	11	3,5	97,222	234,644	41,231	96,707
	12	4,0	111,111	203,132	26,75	88,191
	13	4,5	125	178,868	15,68	81,594
	14	5,0	138,889	159,63	6,965	76,332
	15	6,0	166,667	131,099		
	16	7,0	194,444	110,994		
	17	8,0	222,222	96,087		
	18	9,0	250,0	84,61		
	19	10	277,778	75,51		
	20	11	305,556	68,124		
	21	12	333,333	62,014		
	22	13	361,111	56,878		
	23	14	388,889	52,503		
	24	15	416,667	48,733		
	25	16	444,444	45,452		
	26	17	472,222	42,571		
	27	18	500,0	40,023		
	28	19	527,778	37,753		
	29	20	555,556	35,718		
	30	21	583,333	33,885		
	31	22	611,111	32,225		
	32	23	638,889	30,714		
	33	24	666,667	29,334		
	34	25	694,444	28,069		
	35	26	722,222	26,905		

**TABLA 8** Resultados del cálculo del estado tensional en el macizo rocoso provocado por la detonación de una carga compacta de DynoAnfo.

$R_c^e$	No.	r, m	$\frac{-}{r}$	$\sigma_{r \max}$ , MPa	$\sigma_{t \max}$ , MPa	$\sigma_{cor \max}$ , MPa
0,034	1	0,0575	1,691	9914	4744	2585
	2	0,136	4	3912	1843	1035
	3	0,272	8	1851	848,777	501,111
	4	0,408	12	1194	532,369	330,815
	5	0,5	14,706	958,841	419,294	269,774
	6	1,0	29,412	453,56	177,194	138,183
	7	1,5	44,118	292,722	100,713	96,004
	8	2,0	58,823	214,551	63,816	75,367
	9	2,5	73,529	168,603	42,29	63,157
	10	3,0	88,235	138,468	28,276	55,096
	11	3,5	102,94	117,233	18,475	49,379
	12	4,0	117,65	101,485	11,261	45,112
	13	4,5	132,35	89,367	5,752	41,808
	14	5,0	147,06	79,753	1,414	39,169
	15	6,0	176,471	65,499		
	16	7,0	205,882	55,454		
	17	8,0	235,294	48,007		
	18	9,0	264,706	42,272		
	19	10	294,118	37,726		
	20	11	323,529	34,036		
	21	12	352,941	30,983		
	22	13	382,353	28,417		
	23	14	411,765	26,231		
	24	15	441,176	24,348		

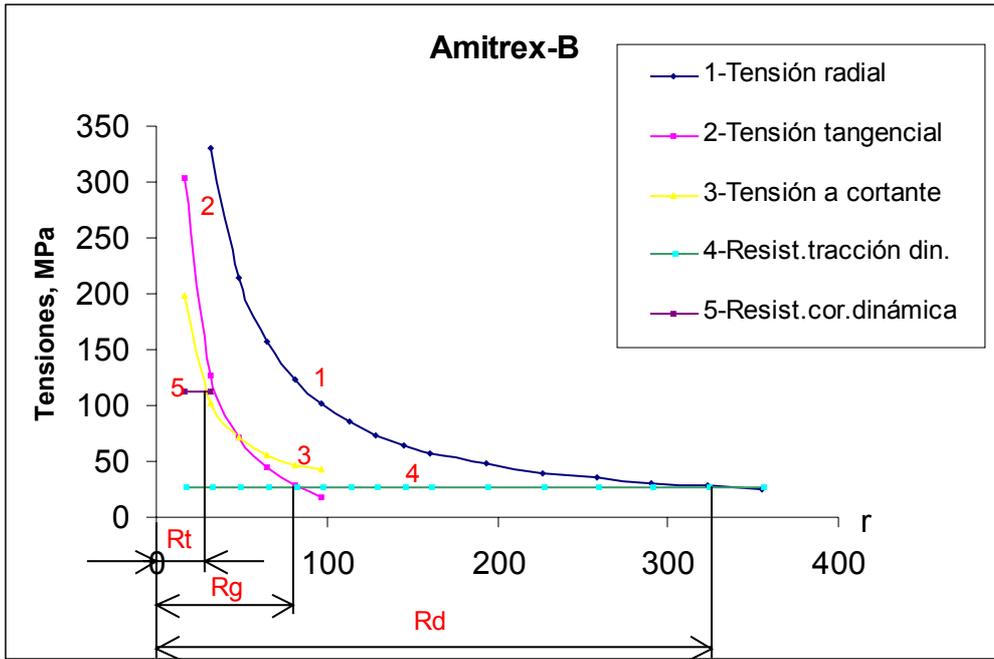


FIGURA 1. Curvas de extinción de las tensiones con el Amitrex-B.

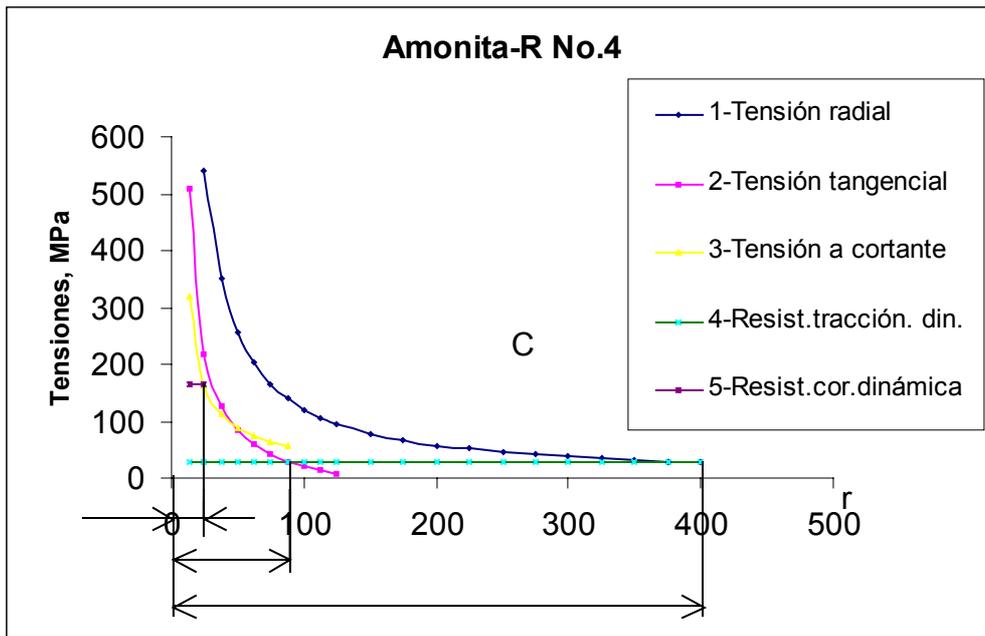


FIGURA 2. Curvas de extinción de las tensiones con la Amonita-R No.4.

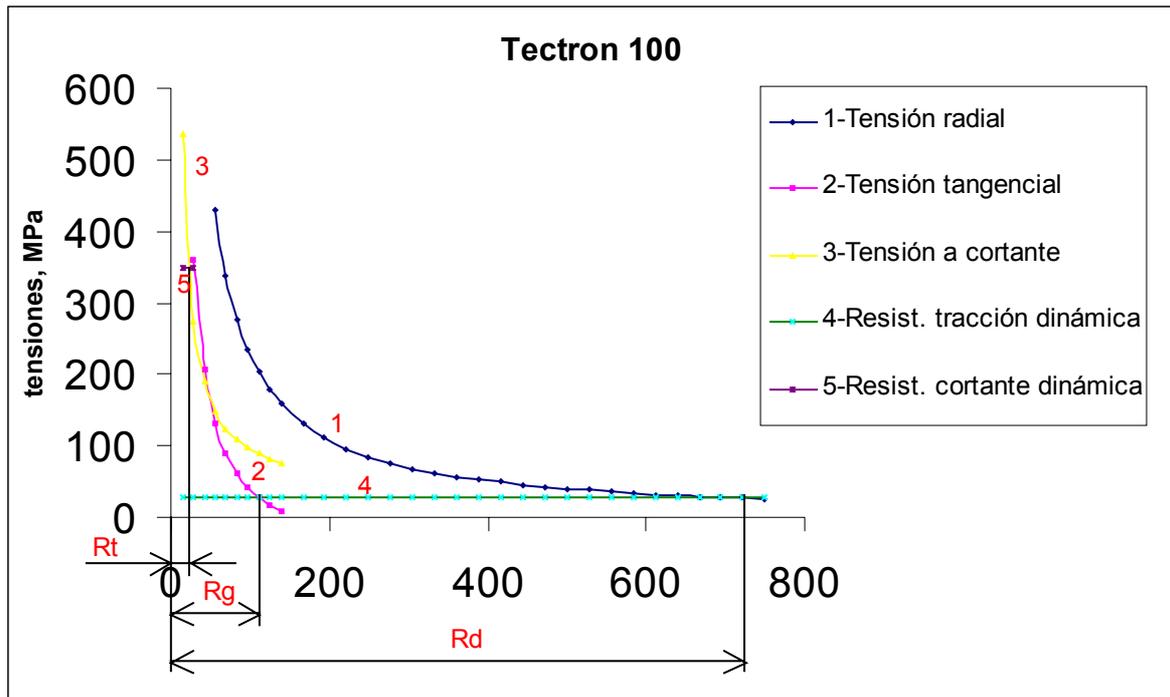


FIGURA 3. Curvas de extinción de las tensiones con el Tectron 100.

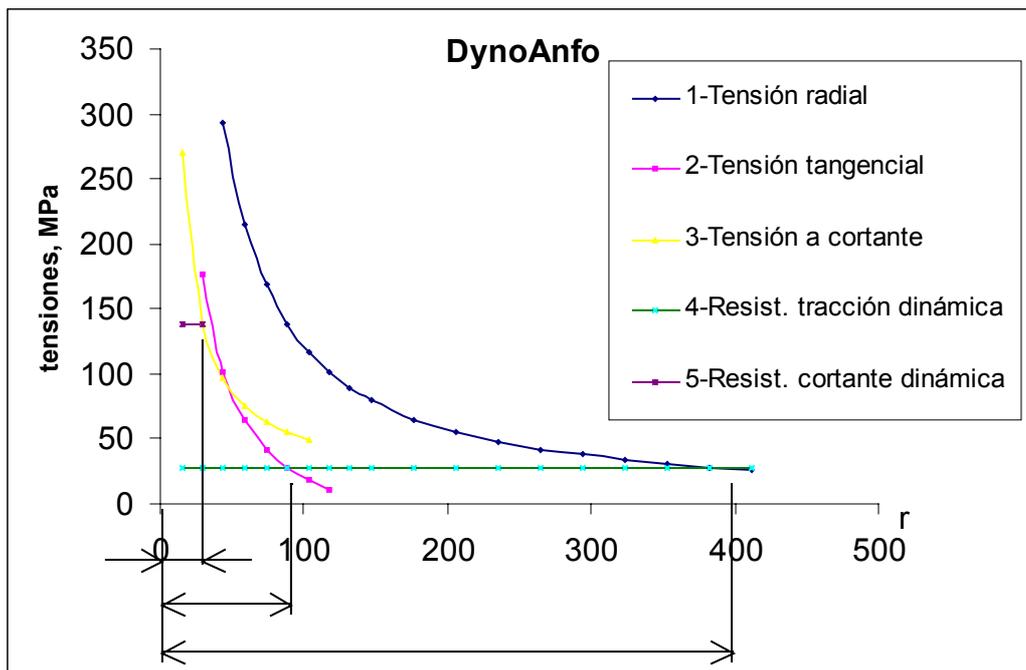


FIGURA 4. Curvas de extinción de las tensiones con el DynoAnfo.

Tabla 9. Resultados del cálculo de los radios.

Sustancia Explosiva	$\bar{R}_t$ , m	$\bar{R}_g$ , m	$\bar{R}_d$ , m	$R_t$ , m	$R_g$ , m	$R_d$ , m
Amitrex – B	29	81	324	0,90	2,51	10
Amonita – R No. 4	25	89	400	1,0	3,56	16
Tectron 100	23	111	722	0,828	3,996	26
DynoAnfo	29	88	397	0,986	2,92	13,5

### CONCLUSIONES

Con el estudio de la acción de la explosión en el medio, se pueden determinar los parámetros teóricos de la red de perforación, los que deben ser ajustados en la práctica mediante experimentación.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Colectivo de autores. (1994). Manual de perforación y voladuras de rocas. Instituto tecnológico geominero de España. Serie: tecnología y seguridad minera, Madrid.
- Fernández, L. (2003). Actualización del sistema de explotación del yacimiento de calizas El Cacao, municipio Jiguaní, provincia Granma. Trabajo de Diploma, ISMMM.
- Jaramillo, J.: 1999. Perfeccionamiento de los trabajos de voladura en el yacimiento XX Aniversario. Tesis de Maestría. ISMMM.
- Otaño, J.: 1998. Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Félix Varela, La Habana.
- Otaño, J.: 1998. Acción de la explosión en las rocas ligadas. Diplomado de voladuras, módulo 3, UNL, Loja, Ecuador.
- Vorobikov, V. y Vannagin I.: 1974. Física de la fragmentación explosiva. IML.
- Vinent Feraud, J. y Mirna Regueíferos. (1977) Informe final sobre los trabajos de exploración detallada del yacimiento de calizas el Cacao, municipio Jiguaní, provincia Granma.
- [http://www.codelcoeduca.cl/tecnico\\_profesional/explotacion\\_minera/modulos/tronadura/tronadura.html](http://www.codelcoeduca.cl/tecnico_profesional/explotacion_minera/modulos/tronadura/tronadura.html)