

MECANISMO DE ROTURA DE LAS ROCAS EN EL CUELE EN CUÑA

Rocks breakdown mechanism in the cut off in wedge

Gilberto SARGENTON-ROMERO¹, Joel BATISTA-LEYVA²

(1)Universidad de Holguín, Email: gstr@uho.edu.cu. (2) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

RESUMEN- Los avances logrados en la física de la explosión y de la fragmentación de rocas y en general en las ciencias mineras aun no permiten modelar teóricamente con precisión el proceso de arranque de las rocas. El diseño de las voladuras y de los cueles al excavar obras subterráneas se ha basado fundamentalmente en la experiencia productiva y la generalización de los resultados alcanzados. Los valores de los criterios de efectividad que se alcanzan con estos diseños son insuficientes por lo que es necesario aplicar métodos más efectivos para resolver este problema. La investigación realizada parte de la concepción de modelar teóricamente el proceso de arranque de las rocas para la excavación de obras subterráneas y mediante voladuras experimentales realizar las correcciones pertinentes, descubrir las regularidades que rigen el mecanismos de rotura de las rocas en los cueles de cuña y establecer las formulas empíricas o semi empíricas para el diseño de los mismos.

Palabras clave: Cuele, superficie libre, confinamiento, cargas compactas, arranque de las rocas.

ABSTRACT-The advances achieved in the physics of the explosion and the fragmentation of rocks and in general in the mining sciences do not yet allow us to model the process of outburst of the rocks theoretically with precision. The designs of the explosions and of the strains to excavate in underground works are being based fundamentally on the productive experience and the generalization of the obtained results. The values of the criteria of effectiveness that have been reached with these designs are insufficient, that makes it necessary to apply more effective methods to resolve this problem. The investigation carried out is based on the conception of modelling the process of outburst of the rocks theoretically for the excavation of underground works and by means of experimental explosions, carry out the pertinent corrections, discover the regularities that govern the mechanisms of breakdown of the rocks in the strains of wedge and to establish the empiric formulas or semi empirics for the design of the said model.

Key words: Cut off, free surface, confinement, compact loads, breakdown of rocks.

INTRODUCCIÓN

Los avances logrados en la física de la explosión y de la fragmentación de rocas y en general en las ciencias mineras, aun no permiten modelar teóricamente con precisión el proceso de arranque de las rocas. El diseño de las voladuras y de los cueles al excavar obras subterráneas se ha basado fundamentalmente en la experiencia productiva y la generalización de los

resultados obtenidos. Los valores de los criterios de efectividad que se alcanzan con estos diseños son insuficientes por lo que es necesario aplicar métodos más efectivos para resolver esta problemática. El proceso de rotura de las rocas mediante voladura ha sido estudiado por diferentes autores (Langefors y Kihlström, 1976; Mindely, 1974; Shemiakin, 1963). Sin embargo aun no existe una metodología que describa este proceso, lo cual se evidencia en el hecho de que ninguna teoría es capaz de dar el tratamiento adecuado a la rotura de las rocas en el cuele en cuña.

El incremento de la efectividad de los trabajos de voladura se relaciona en gran medida con la fundamentación teórico - experimental del mecanismo de rotura de las rocas en los cueles.

La excavación de obras subterráneas presenta las siguientes particularidades:

- Limitado frente de los trabajos.
- Limitada cantidad de obreros y mecanismos ubicados en el frente.
- Variabilidad de las condiciones ingeniero – geológicas a medida que avanza el frente, esta particularidad es mucho mas acentuada cuando las obras son extensas.
- Exigencias especiales de la técnica de seguridad y de la salubridad industrial.
- Dependencia directa de la posibilidad de ejecución de los procesos de ejecución principales de los auxiliares.

Estas particularidades tan específicas de la construcción subterránea, son condicionantes a su vez de la tecnología de arranque de las rocas por voladura. La principal peculiaridad de las voladuras para el laboreo de excavaciones es la existencia de una sola superficie libre, el propio frente de avance.

El principio de excavación se basa en crear primero una oquedad o hueco libre que se denomina cavidad de cuele o de corte (tapón). Generalmente está ubicado en el centro de la excavación, hacia la que van rompiendo sucesivamente los restantes grupos de barrenos (contracuele, destroza, contorno y zapatera, ensanche, parámetros, corona y elevación) (Galabré, 1965) que ensanchan la cavidad con el desarrollo de la voladura. (López Jimeno et al , 1994).

Las fases restantes de la voladura han de proyectarse de forma tal que garanticen:

- El contorno deseado de la roca remanente con la menor alteración y la mayor estabilidad posible;
- Una granulometría adecuada y uniforme que permita una carga más productiva de las rocas en los medios de transporte.

- Una proyección o lanzamiento de los pedazos de manera tal que facilite el proceso de carga posterior.
- El funcionamiento efectivo del equipamiento de laboreo;
- El mayor avance del frente, caracterizado por el aprovechamiento de los barrenos (máximo valor del coeficiente de aprovechamiento de los barrenos -CAB).

La cavidad de cuele, tiene generalmente un área o superficie entre uno y dos metros cuadrados. Las consideraciones existentes sobre la fragmentación de las rocas en los frentes de avance parten de que, en estas condiciones el macizo de rocas se encuentra bajo la acción de una considerable constricción (confinamiento) por parte de las rocas circundantes. La influencia de este confinamiento es tanto mayor cuanto menor sea el área de la sección transversal de la excavación y mayor la longitud de los barrenos.

Con el objetivo de garantizar las mejores condiciones de fragmentación y de alcanzar el mayor arranque, es necesario crear condiciones de sollicitación, que favorezcan la formación de la mayor cavidad de cuele tanto en área como en profundidad. Esto asegura condiciones favorables para la fragmentación de la parte restante del volumen de roca en la pega. En base a esta representación se considera que los barrenos de cuele trabajan en condiciones de máximo confinamiento, mientras que los de arranque lo hacen en ausencia de éste. Es evidente que se precisa alcanzar una estructura del cuele tal que pueda garantizar el máximo de descarga del frente de la acción del confinamiento, aunque no es el único factor determinante de la efectividad de la voladura.

Para el cálculo de las cargas, los investigadores Lijin (1966); Mosiniets y Abramov (1973) y Mindely (1974) parten del principio de considerar las cargas de los barrenos de arranque como cargas de fragmentación y lanzamiento normal y las de cuele como de lanzamiento reforzado, incrementado en un 10 – 20 % de la magnitud de la carga de los primeros y las de contorno como cargas de mullido reducido. Esto quiere decir que la acción de la explosión se va reduciendo desde el lugar de ubicación del cuele (por lo general el centro de la excavación) en dirección al perímetro final de la misma.

Muchos de los problemas prácticos de las voladuras en la excavación de obras subterráneas se resuelven por vía experimental, ya que los modelos teóricos existentes no los solucionan en su totalidad. La investigación realizada parte de la concepción de modelar teóricamente el proceso de arranque de las rocas para la excavación de obras subterráneas y mediante voladuras experimentales realizar las correcciones pertinentes, descubrir las

regularidades que rigen el mecanismo de rotura de las rocas en los cueles de cuña y establecer las formulas empíricas o semi empíricas para el diseño de los mismos.

MATERIAL Y MÉTODO

Es posible generalizar en muchos casos la experiencia de la producción, y a partir de la modelación físico – matemática llegar a conclusiones respecto a los parámetros racionales de los trabajos de perforación y voladura. La mayoría de las expresiones de cálculo existentes son empíricas o semi empíricas por lo que dependen mucho de las condiciones en que fueron deducidas. En investigaciones previas (Sargentón y Quiroga, 1994; Sargentón, 1997) se determinó, a partir de la esencia física de la acción de la explosión sobre el medio, la modelación físico – matemática de los parámetros de la onda de choque y la onda de tensiones que ella genera en el macizo rocoso para diferentes explosivos, los parámetros principales para el diseño del cuele en cuña (distancia entre los pares de barrenos de cuele a_c , la línea de menor resistencia LMR, W) y la distancia mínima entre los extremos de los barrenos por el fondo b_c .

Se utilizó la modelación físico – matemática de la onda de choque y de tensiones de Borovikov y Vaniagil (1974) para cargas compactas, y a partir de las ondas de tensiones se determinaron los radios de agrietamiento y trituración para los tres litologías de calizas de la Formación Remedios (organógenas, criptocristalinas, y microcristalinas).

Los parámetros de la onda de choque en el limite de separación carga – medio dependen sustancialmente de las propiedades físicas del medio que rodea la carga. Para valorar la presión en el frente de la onda de choque se utilizan las relaciones que se desprenden de la condición de refracción de la onda a la roca a través de una pared plana, es decir de la condición de correspondencia dinámica en los frentes de las ondas reflejadas y refractadas.

El sistema de ecuaciones obtenido de estas condiciones enlaza con la adiabática de choque para rocas sólidas:

$$P_f / \rho_o C_o = 1/A[\rho_f/\rho_o]^m - 1] \quad (1)$$

Donde:

ρ_o, C_o – densidad y velocidad del sonido en la roca no perturbada por el frente de la onda.

ρ_f, P_f – densidad de la roca y presión en el frente de la onda refractada;

A, m – coeficientes numéricos adimensionales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros de la onda de choque para las litologías de calizas de la formación Remedios y seis tipos de explosivos. Los mayores valores de los parámetros se obtuvieron con los explosivos más potentes.

El mayor acople de impedancia se logra entre la amonita potente No.1 (impedancia de $9,375 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) y las calizas criptocristalinas ($13,77 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$). La componente radial de la onda de tensiones se determino según la ley exponencial:

$$\sigma_r = P_o C / \bar{r}^{n1} \quad (2)$$

Donde: P_o – presión refractada a la roca

C- constante

r – distancia relativa;

n1- coeficiente de extinción de la onda.

Las componentes tangenciales de la onda de tensiones se determino por la expresión:

$$\sigma_{y \max} = (C_1 + C_2 \bar{r}) \sigma_{r \max} \quad (3)$$

Donde:

C_1 y C_2 – son constantes que dependen de la impedancia acústica de las rocas.

A partir de los valores de las tensiones radiales y tangenciales (tabla 2) y la resistencia estática de las rocas al cortante y a la tracción (Sánchez, 1996) por calculo se determinó la resistencia dinámica de las rocas al cortante y a la tracción y a partir de las mismas los radios de agrietamiento, de trituración y las líneas de menor resistencia W según se muestra en la tabla 3.

De la generalización de los resultados de la práctica (Sargentón , 1997) respecto al trabajo de los cueles en diferentes condiciones ingeniero – geológicas y su comparación con los valores de la distancia entre pares de barrenos por el fondo y la LMR , W en la zona de fragmentación se plantean las siguientes expresiones:

$$b_c = 2 \cdot R_t \cdot R_g \cdot K_c , m \quad (4)$$

Donde:

K_g - coeficiente de agrietamiento

K_c - coeficiente de corrección;

R_t - Radio de trituración, m.

La distancia entre los pares de barrenos a_c se determina por la expresión:

$$a_c = 2 \cdot R_g \cdot K_g \cdot K_c, \text{ m} \quad (5)$$

Donde: R_g - radio de agrietamiento, m.

Los valores calculados por las expresiones (4) y (5) permiten:

- La fragmentación y el arranque por el fondo de los barrenos el cuele de cuña.
- El corte por la línea de unión de los pares de barrenos
- La limpieza de la cavidad de cuele.

Los parámetros de diseño del cuele en cuña se muestran en la tabla 4.

CONCLUSIONES

1. El modelo matemático de Borovikov et al. (1973) permite determinar preliminarmente los parámetros de los cueles en cuña y estos resultados pueden ser ajustados y validados mediante voladuras experimentales.
2. La confirmación de los mecanismos de rotura de las rocas en los cueles en cuña permite plantear las expresiones (4) y (5) para el cálculo de los parámetros de los mismos y su diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOROVIKOV V.M. e I.F. VANIAGIL, **1974**. *Física de la fragmentación por voladura*. Instituto de Minas de San Petersburgo. San Petersburgo. 60 pp.
- LANGEFORS U, KIHLTRONS B., **1976**. *Técnica moderna de voladura de rocas*. URMO, Bilbao España. 425 pp.
- LIJIN P.A., **1964**. *El conjunto de barrenos en el laboreo de excavaciones mineras*. Nedra. Moscú. 100 pp.
- LÓPEZ JIMENO, C. ET AL., **1994**. *Manual de perforación y voladura*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 442 pp.

MINDELY, E.O., 1974. *Fragmentación de rocas*. Nedra. Moscú. 1974. 600 pp.

MOSINIETS V.N. Y A.V. ABRAMOV, 1973. *Fragmentación de roca agrietadas y alteradas*. Nedra. Moscú. 248 pp.

SÁNCHEZ RICARDO, M., 1996. *Métodos sísmicos y geoelectrónicos en etapa de control geotécnico a obras subterráneas*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría. Ciudad Habana. 100 pp.

SARGENTÓN, R.G. y S.V QUIROGA, 1994. *Selección efectiva de cueles al excavar túneles*. Memorias II Congreso Cubano de Geología y Minería. Santiago de Cuba. p. 3

SARGENTÓN, R.G., 1997. *Perfeccionamiento de los trabajos de perforación y voladura en la excavación de túneles en Cuba Oriental*. Tesis de Maestría. ISMMM. Moa. 101 pp.

SHEMIAKIN E.I., 1963. *Sobre las ondas de tensiones en rocas resistentes*. *Revista PMTF*. 5 : 45-60.

FIGURAS Y TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la onda de choque con cargas compactas en calizas de la Formación Remedios.

Explosivos	Calizas organógenas			Calizas microcristalinas			Calizas criptocristalinas		
	P,MPa	N,m/s	V,m/s	P,MPa	N,m/s	V,m/s	P,MPa	N,m/s	V,m/s
Amonita 6JV	6074	2392	486	6381	2523	445	6464	2555	431
Amonal	5791	2254	467	6066	2370	424	6140	2399	411
Amonal potente No.3	5997	2334	481	6293	2459	439	6372	2490	425
Amonita potente No.1	14061	3722	971	15200	4039	930	15517	4122	916
Gramonal	4612	1957	382	4802	2044	341	4852	2885	330
Anfo	2182	1473	189	2248	1524	165	2266	1536	159

Tabla 2. Valores de las componentes radiales y tangenciales en la onda de tensiones para cargas compactas en calizas de la Formación Remedios

r	R̄	Calizas organógenas		Calizas microcristalinas		Calizas criptocristalinas	
		σ_{rmax}	σ_{ymax}	σ_{rmax}	σ_{ymax}	σ_{rmax}	σ_{ymax}
0,027	2	7125	2410	8512	3289	8917	3016
0,041	3	2600	872	3106	1190	3254	1092
0,055	4	1738	580	2076	790	2175	726
0,068	5	1272	422	1519	575	1591	528
0,096	7	794	261	948	355	994	326
0,110	8	658	215	787	292	824	269
0,123	9	558	181	667	247	699	227
0,137	10	482	156	576	212	603	195

0,151	11	422	136	504	184	528	170
0,164	12	373	119	446	162	467	149
0,274	20	222	68	265	92	278	85
0,411	30	142	41	170	55	178	51
0,548	40	104	28	124	37	130	35
0,685	50	81	20	97	27	101	26
0,822	60	66	16	79	20	83	19,5
0,959	70	56	12	67	16	70	15,2
1,096	80	48	9,7	58	12	60	12,0
1,233	90	42	7,7	50,8	9,5	53	9,6
1,370	100	38	6,2	45	7,4	47	7,8

Tabla 3. Valores del radio de trituración, agrietamiento y de la línea de menor resistencia (W) para cargas compactas.

EXPLOSIVOS	Calizas organógenas			Calizas microcristalinas			Calizas criptocristalinas		
	R _t	R _g	W	R _t	R _g	W	R _t	R _g	W
Amonita 6JV	0,137	0,822	1,233	0,144	0,959	1,302	0,130	0,890	1,370
Amonal	0,140	0,840	1,260	0,147	0,980	1,330	0,133	0,910	1,400
Amonal potente No.3	0,154	0,924	1,386	0,162	1,078	1,463	0,146	1,001	1,540
Amonita potente No.1	0,160	0,960	1,440	0,168	1,120	1,520	0,152	1,040	1,600
Gramonal	0,138	0,828	1,242	0,145	0,966	1,311	0,131	0,897	1,380
ANFO	0,123	0,738	1,107	0,129	0,861	1,168	0,117	0,800	1,230

Tabla 4. Parámetros del cuele en cuña para las calizas de la formación Remedios.

Explosivos	Calizas organógenas				Calizas microcristalinas				Calizas criptocristalinas			
	b _{c,m}	a _{c,m}	W _{c,m}	α _c	b _{c,m}	a _{c,m}	W _{c,m}	α _c	b _{c,m}	a _{c,m}	W _{c,m}	α _c
Amonita 6JV	0,17	0,57	1,15	80	0,165	0,61	1,64	75	0,180	0,68	2,13	80
Amonal	0,18	0,59	1,17	80	0,169	0,63	1,64	75	0,184	0,70	2,13	80
Amonal potente . 3	0,19	0,65	1,18	80	0,187	0,69	1,66	75	0,202	0,77	2,15	80
Amonita potente . 1	0,20	0,67	1,18	80	0,193	0,71	1,67	75	0,211	0,80	2,16	80
Gramonal	0,174	0,58	1,16	80	0,167	0,62	1,64	75	0,181	0,69	2,13	80
ANFO	0,154	0,52	1,14	80	0,148	0,55	1,62	75	0,162	0,61	2,11	80