



Perfeccionamiento de los trabajos de perforación y voladura en la cantera El Pílon*

Alberto Paulo Bunga

Especialidad: Ingeniería en Minas

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se expusieron las modificaciones propuestas para lograr el perfeccionamiento de los trabajos de perforación y voladura en la cantera El Pílon con el objetivo de disminuir la obtención de rocas sobredimensionadas durante la fragmentación del macizo rocoso para su posterior trituración y clasificación. Se sugirió una modificación de los valores propuestos en el Manual de Perforación y Voladura de Rocas, que se adaptan a las características de la cantera en estudio. Se logra disminuir el porcentaje de rocas sobredimensionadas hasta un 5 %, permitiendo así un ahorro de 2,02 \$/m³.

Palabras clave: arranque de roca; perforación y voladura; cantera de materiales de la construcción; áridos.

* Trabajo tutorado por los Dres. Yoandro Diéguez García y Roberto Watson Quesada.

Recibido: 17 febrero 2016 / Aceptado: 24 de noviembre 2016.

Perforation and blasting work improvement in the Pilon quarry

Abstract: This investigation proposes modifications to improve the perforation and blasting works being carried out in the Pilon quarry in order to decrease the number of oversized rocks during the fragmentation of the rocky massif for further grinding and classification. The values established in the Manual for Blasting and Perforation of Rocks were proposed to be modified, which is consistent with the characteristics of the quarry under investigation. This resulted in a reduction of oversized rocks by up to 5%. This accounts for savings of 2,02 \$/m³.

Key words: digging; perforation and blasting; materials of construction quarry; aggregates.

Introducción

En la cantera El Pilón los trabajos de perforación y voladura que se realizan no permiten obtener en todos los casos la granulometría deseada, por lo que causa un volumen considerable de rocas sobredimensionadas que obligan a realizar con sistematicidad la fragmentación secundaria; aspecto este que incrementa considerablemente los costos de producción de la entidad minera.

Durante los trabajos de perforación y voladura en la cantera se constatan deficiencias como:

Todos los parámetros del diseño de la voladura fueron proyectados de manera empírica a partir de experiencia acumulada por el especialista en la cantera. Partieron de un cálculo inicial basado en la metodología propuesta en 1998 (Otaño, 1994).

No se concibe el ajuste de los patrones de voladura a partir del cambio de barrenación, lo que influye negativamente en los resultados de la voladura. En ocasiones, por problemas técnicos, es necesario cambiar en una misma red de perforación de 85 mm a 115 mm y viceversa.

Existe una inadecuada gestión y distribución de la sustancia explosiva lo que genera el uso excesivo de explosivos, que es añadido posteriormente de manera aleatoria en los taladros, después de estar cargados; aspecto este que genera un onda área de gran magnitud.

Por ello, el objetivo de este trabajo es perfeccionar los trabajos de perforación y voladura en la cantara El Pilón para disminuir la obtención de rocas sobredimensionadas y los costos de arranque en la entidad minera.

La cantera ya ha sido caracterizada en trabajos anteriores (Hernández *et al.*, 2014; Mena, 2015, 2016) y se identificaron y valoraron las principales afectaciones ambientales producidas por la explotación a cielo abierto y se propuso un plan de medidas para mitigar los daños que la cantera ocasiona.

Metodología

Se utilizó el método para el cálculo y diseño de voladuras en canteras propuesto por Pernía y otros colaboradores (1987), sobre todo por los siguientes elementos:

Se concibe para canteras de pequeño diámetro (hasta 150 mm).

Es muy fácil de calcular y de reajustar a partir de las particularidades del macizo de rocas.

Brinda una secuencia completa de pasos, en la cual se incluyen todas las variables del proceso de la voladura.

Es una de las más empleadas a nivel internacional por los buenos resultados que se han obtenido.

Caracterización de los trabajos de perforación y voladura en la cantera

El proceso de producción obedece a un conjunto de operaciones, de los cuales depende la calidad del producto que se pone a la disposición para el consumo, entre las operaciones principales se encuentran la perforación y la voladura que constituyen la base de todo proceso. En esta cantera, la cota del piso actual es la + 60 (escalón más bajo en explotación) y su cota inicial de explotación fue la + 100 (escalón más alto en explotación).

El talud del escalón para las rocas del yacimiento es de 85°. Este talud fue tomado también para la posición final del escalón.

Se utiliza como sustancia explosiva SenatelTM Magnafrac como carga de fondo (5 cartuchos de 0,5 m de longitud con diámetros de 75 mm y 100 mm) y el AMEXTM (ANFO) como carga de columna. La altura del escalón es de 12 m, la sobre perforación de un 1 m. Para el relleno se emplean los detritos que se desprenden de la perforación y ocupan aproximadamente 2 m de longitud.

Tecnología de los trabajos de perforación y voladura

Perforación primaria: Carretilla barrenadora Atlas Copco (10,2 m/hora).

Barrenación secundaria: Martillo hidráulico contratado a EXPLOMAT.

Esquema de barrenación: A tres bolillos con dos hileras de taladros.

Carga de explosivos

En las Tablas 1 y 2 se describen las características de las sustancias explosivas utilizadas en la cantera.

Tabla 1 Características de la sustancia explosiva. Senatel™ Magnafrac

Características	Senatel™ Magnafrac
Diámetro (mm)	75-100
Longitud de cartucho (mm)	500
Densidad (g/cm ³)	1,10-1,20
Coefficiente capacidad de trabajo	0,86
Peso del cartucho	2,5 kg
Fuerza relativa en peso (%)	107
Fuerza relativa en volumen ANFO g/cm ²	0,8
Rango de velocidad de detonación	2,7-6,1
Co ₂ kg/t	161

Tabla 2. Características de la sustancia explosiva

Características	Amex™
Densidad (g/cm ³)	0,80
VOD típico (km/s)	2,5-4,8
Fuerza relativa en peso	100
Fuerza relativa en volumen	100
CO(kg/t) 182	2
Diámetro mínimo por barreno (mm)	38

La descripción del documento técnico para el desarrollo de los trabajos de perforación y voladura existentes en la cantera han sido diseñados y entregados por el técnico principal; los parámetros del mismo se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de diseño del pasaporte de perforación y voladura que se emplea actualmente en la cantera

Parámetros	U/M	Diámetro 85 mm	Diámetro 115 mm
Altura del escalón	m	12,00	12,00
Línea de menor resistencia	m	2,00	2,50
Distancia entre filas	m	2,80	3,50
Distancia entre barrenos	m	3,50	4,00
Sobreperforación	m	1,00	1,00
Longitud de carga total taladro	m	11,00	11,00
Longitud de atraque	m	2,00	2,00
Ángulo de perforación	°	85°	85°

Propuesta de perfeccionamiento de las labores de perforación y voladura

Soluciones para la presencia de cavernosidad en los frentes de arranque.

Cuando hay presencia de cavernas en el intermedio de la cavidad de carga se propone taponar el taladro con sacos vacíos de ANFO, creando una carga espaciada, de esta forma se evita la pérdida de la sustancia explosiva por las cavernas que presenta el macizo; otra variante puede ser el empleo de tacos de madera con longitud igual a la de la cavidad combinada con detritos de perforación.

Si la caverna es pequeña, la misma debe ser rellenada con detritos de perforación o arena y si la cavidad vacía es de gran magnitud debe ser taponado el fondo del taladro (Figura 1).

Se debe emplear para todos los casos existentes, además, fundas plásticas (mangas), con las que se lograría la mejor distribución de la carga en toda la longitud del taladro.

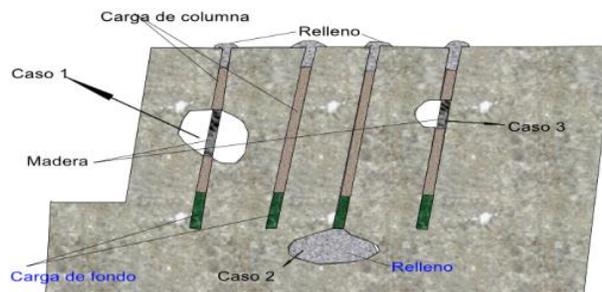


Figura 1. Casos de presencia de cavernosidad.

Durante la perforación se deben registrar los taladros con presencia de cavernas, para que cuando se realice la carga de la sustancia explosiva se efectúe cuidadosamente y se facilite el trabajo.

Medidas correctoras durante la carga de la sustancia explosiva a granel. En todos los casos se recomienda comprobar la elevación de la carga de los explosivos a granel para tomar las medidas pertinentes en caso de presencia de cavernas que no fueron detectados durante la perforación.

Cálculo de las cargas de columna

Para los cálculos de las cargas de columna se han desarrollado varias metodologías, cuyas aplicaciones dependen, fundamentalmente, de la estructura del macizo rocoso.

Las expresiones por el método MPVR fueron desarrolladas, según una secuencia de experimentos, en un macizo de rocas con estructura diferente a la encontrada en la cantera El Pilón, por lo que se realizó la experimentación para encontrar el valor adecuado que se adapte a las particularidades del macizo de rocas en esta cantera. Fue introducido el coeficiente que considera la composición estructural del macizo a partir del agrietamiento, con lo que se disminuyeron las proporciones en la mayoría de las variables. En las Tablas 4 y 5 se muestran las expresiones para el cálculo de las cargas y para los índices técnico-económicos, respectivamente, con la metodología MPVR y con la nueva propuesta.

Tabla 4. Metodología para el cálculo de las cargas con las expresiones del MPVR y con la nueva propuesta

Variabes	MPVR	Propuesta	Magnitudes(m)	
Diámetro del taladro-D			0,115	0,085
Piedra-B	37D	35D	4,00	2,97
Espaciamiento-S	47D	40D	4,60	3,4
Sobreperforación- J	11D	11D	1,27	0,9
Retacado-T	35D	30D	3,45	2,55
Longitud de carga de fondo-Lf	30D	25D	2,87	2,1
Altura del Banco-H	-	-	12,00	10,00
Longitud de los taladros-L	$L = (H/\cos\beta) + (1 - (B/100))*J$		13,50	13,21

Tabla 5. Cálculo de los índices técnico-económicos

Parámetro	Diámetro (m)		UM	Variable
	0,085	0,115		
Volumen arrancado	125,44	228,57	m ³	VR
Rendimiento de arranque	9,30	16,95	m ³ /m	RA
Concentración de la carga de fondo por metro	6,40	11,40	kg/m	qf
Carga de fondo	13,63	32,71	kg	Qf
Longitud de la carga columna	8,53	7,18	m	Lc
Concentración de la carga de columna por metro	4,54	7,60	kg/m	qc
Carga de columna	38,72	54,57	kg	Qc
Carga de taladro	52,35	87,28	kg	Qt
Consumo específico de explosivo	0,42	0,38	kg/m ³	CE

Cálculo de los índices técnico-económicos

Granulometría media de fragmentación (Cunningham, 1987).

Kuznetsov (1973) se refiere al tamaño medio de la fragmentación, al factor de carga de TNT y a la estructura geológica. Muestra la relación particular con el tipo de roca. Sin embargo, aunque el tamaño medio de la fragmentación podía ser predicho, no aborda la cantidad de finos producidos o la cantidad de rocas grandes; el mismo tamaño medio podía resultar de rocas con 60 cm de diámetro y polvo o con cada parte de la voladura de un tamaño exacto de 30 cm. No trata la distribución real de los tamaños en una función de la plantilla ni la manera en la que el explosivo es aplicado geoméricamente al macizo rocoso.

Con el uso de la fórmula original de Kuznetsov (1973) y las modificaciones aplicadas por Cunningham (1987) se puede determinar el tamaño medio de la fragmentación con cualquier explosivo y también el índice de uniformidad. Con esta información se puede ejecutar una proyección Rosin Rammler. Uno de los parámetros más importantes de conocer y, quizás el más cuestionado en lo referente a las variables para obtener una buena estimación de la fragmentación, es el tamaño medio de fragmentación (X50). La ecuación propuesta es la más conocida por pertenecer al modelo predictivo más utilizado (modelo de Kuz-Ram) y se describe a continuación:

Modelo Kuz-Ram de la ecuación de granulometría media modificado por Cunningham (1987)

Para diámetro de 85 mm:

$$X_m = A * \vartheta^{-0,8} * Q_E^{0,167} * \left[\frac{115}{SANFO} \right]$$

$$X_m = 3,37 * (0,42)^{-0,8} * (1151,7)^{0,167} * \left[\frac{115}{100} \right] = 23 \text{ cm}$$

Análogamente para diámetro de 115 mm X_m será 24 cm.

Donde:

X_m : Granulometría media (cm);

ϑ : gasto específico (kg/m³);

QE: Cantidad de carga por taladro (kg);

SANFO- Fuerza relativa en peso;

A: Índice de volubilidad.

$$A = 006(RMD + JF + RDI + HF)$$

$$A = 0,06(20 + 20 + 12,5 + 10) = 3$$

Donde:

RMD: Descripción del macizo;

JF: Espaciamiento entre juntas;

RDI: Índice de densidad de las rocas;

$$RDI = 25(\rho) - 50 = 12,5$$

HF: Factor de roca

$$HF = \frac{R_c}{10} = \frac{100}{10} = 10$$

Cálculos económicos del proceso de perforación y voladura

El costo de los procesos tecnológicos de excavación-carga del mineral fragmentado y su transportación disminuye considerablemente con el incremento de la calidad de la fragmentación de las rocas. Este parámetro es considerado como uno de los factores más importantes en las canteras porque tiene un efecto directo en la eficiencia y el costo de perforación y voladura. El costo total de la producción del árido en las canteras alcanza su valor mínimo cuando se obtienen resultados óptimos en la fragmentación.

Cálculos económicos de los trabajos de perforación y voladura en la actualidad

En las Tablas 6 y 7 se ilustran los indicadores que se tienen en cuenta para los cálculos económicos de los trabajos de perforación y explosión que se desarrollan actualmente en la cantera. Para el arranque de un volumen de 11 675,00 m³ se gasta un total \$ 37 423,58; este valor está condicionado por las deficiencias técnico-organizativas que se constataron en la cantera, principalmente por el uso irracional de los materiales.

Tabla 6. Resultados de los costos de los trabajos de perforación y voladura en la actualidad para un diámetro de 85 mm

Indicadores	Cantidad	UM	Precio (\$)	Importe (\$)
Barrenación y voladura	11 675,00	m ³	2,90	33 857,50
Sepro	12,00	h	29,16	349,92
Gasto de material	\$ 6 601,91	-	-	6 601,91
Descuento 10 %	1 167,50	m ³	2,90	3 385,75
Total				37 423,58

Tabla 7. Gastos de materiales

Productos	UM	Cantidad	Precio (\$)	Importe(\$)
Senatel™ Magnafrac 75 x 500 mm	t	1,050	1 929,10	2 025,56
Amex	t	2,700	1 420,00	3 834,00
Exel Handidet de 8 m	u	55	3,82	210,10
Exel Handidet de 13 m	u	30	4,42	132,60
Exel Handidet de 18,2 m	u	40	5,04	0,00
Detonadores eléctricos instantáneos	u	3	1,70	5,10
Cordón detonante	m	100	0,33	33,09
Exel Handidet de 10 m	u	10	4,10	40,96
Exel TD de 200 m	u	4	25,86	15,30
Exel Conectadet de 10 m	u	5	3,06	0,00
Total				\$ 6 601,91

Cálculos económicos de los trabajos de perforación y voladura con la nueva propuesta

En las Tablas 8, 9, 10 y 11 se resumen los cálculos económicos para los dos diámetros empleados en los trabajos de perforación y explosión en la cantera El Pilón. Para un diámetro de 85 mm se arranca un volumen de 2 448 m³ *in situ*, lo que implica un costo total de \$2 899,84 y para diámetro de 115 mm se arranca un total de 4 416 m³, con un costo de \$17 522,98. En la Tabla 12 y en la Figura 2 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos antes y después de la aplicación de la metodología para el diseño del patrón de voladura con un diámetro de 85 mm.

Tabla 8. Resultados de los costos de los trabajos de perforación y voladura obtenidos con un diámetro de 85 mm

Indicadores	Cantidad	UM	Precio (\$)	Importe (\$)
Barrenación y voladura	24,48	m ³	2,90	1 222,48
Sepro	12,00	h	29,16	349,92
Gasto de material	\$ 6 601,91	-	-	972,48
Descuento 5%	122,40	m ³	2,90	354,96
Total				2 899,84

Tabla 9. Gasto de materiales

Productos	UM	Cantidad	Precio (\$)	Importe(\$)
Senatel™ Magnafrac 75 x 500mm	t	0,758	1 929,10	1 462,26
Amex	t	1,490	1 420,00	2115,80
Exel Handidet de 20	m	22	5,26	115,72
Exel Conectadet de 200	m	1	25,86	25,86
Exel Conectadet de 12	m	1	3,30	3,30
Detonadores eléctricos instantáneos	u	2	1,70	3,40
Total				3 726,34

Tabla 10. Resultados de los costos de los trabajos de perforación y voladura obtenidos con un diámetro de 115 mm

Indicadores	Cantidad	UM	Precio (\$)	Importe (\$)
Barrenación y voladura	4,416	m ³	2,90	12 806,4
Sepro	12	h	29,16	349,92
Gasto de material	3 722,94	-		3 726,34
Descuento 5 %	220,8	m ³	2,90	640,32
Total				17 522,98

Tabla 11. Gasto de materiales

Productos	UM	Cantidad	Precio (\$)	Importe (\$)
Senatel Magnafrag 100x500	t	0,758	1 929,10	1 462,26
Amex	t	1,490	1 420,00	2 115,80
Exel Handidet de 20	m	22	5,26	115,72
Exel Conectadet de 200	m	1	25,86	25,86
Exel Conectadet de 12	m	1	3,30	3,30
Detonadores eléctricos instantáneos	u	2	1,70	3,40
Total				3 726,34

Tabla 12. Gastos por metro cúbico de roca arrancada antes y después de la propuesta, para un diámetro de 85 mm

Parámetros	Antes	Después
Volumen de roca arrancada (m ³)	11 675,00	2 448,00
Gasto total (\$)	37 423,58	2 899,84
Gasto por metro cúbico de roca arrancada (\$)	3,20	1,18

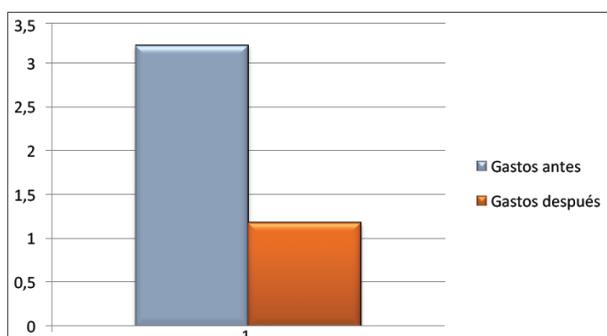


Figura 2. Gráfico comparativo de los costos por metro cúbico de roca arrancada antes y después de la propuesta.

Pasaporte de perforación y explosión de la nueva propuesta

En la Figura 3 se ilustran las nuevas propuestas para los pasaportes de perforación y explosión para los diámetros de 115 mm y 85 mm, respectivamente, en los cuales se reajustaron los parámetros de sus diseños para reducir la obtención de volumen de rocas sobredimensionadas hasta un 5 % y reducir, de un modo general, el costo total de explotación.

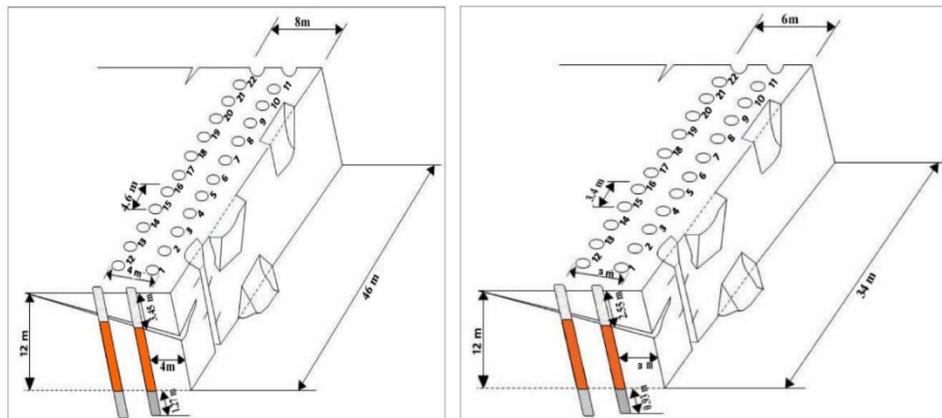


Figura 3. Ubicación de los parámetros de perforación y explosión en el bloque para un diámetro de 115 mm y 85 mm.

Conclusiones

La evaluación de los trabajos de perforación y voladura realizados en la cantera permitió identificar las deficiencias técnicas y organizativas que afectaban el proceso de arranque, lo que permitió en cada caso proponer las medidas para su solución.

La propuesta de perfeccionamiento realizada fue validada en la cantera con el empleo del diámetro de perforación de 85 mm, logrando disminuir el porcentaje de rocas sobredimensionadas en un 5 %.

Con esta opción de perfeccionamiento de las labores de perforación y voladura en la entidad minera se ahorra un monto de 2,02 \$/m³ en cada voladura efectuada, para un diámetro de 85 mm.

Referencias bibliográficas

- CUNNINGHAM, C. V. B. 1987: Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model-four years on. In Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, p.475-487.
- HERNÁNDEZ, N.; ALMAGUER, Y.; ROSARIO, Y. & OTAÑO, J. 2014: Determinación del método de arranque de la roca en la cantera Pilón, Mayarí. *Minería y Geología* 30(2): 42-57.
- KUZNETSOV, V. M. 1973: The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Journal of Mining Science* 9(2): 144-148
- MENA, I. 2015: Efecto sobre el medio ambiente de la explotación del yacimiento de calizas El Pilón. *Ciencia & Futuro* 5(4): 84-97.
- MENA, I. 2016: Plan de medidas de mitigación de efectos negativos generados por la explotación en la cantera El Pilón. *Ciencia & Futuro* 6(1): 80-89.
- OTAÑO, J. 2014: Fragmentación de Rocas con Explosivos. T. II. Félix Varela, La Habana.
- PERNÍA, J.; LÓPEZ, C.; PLA, F. & LÓPEZ, E. 1987: *Manual de perforación y voladuras en rocas*. Instituto Tecnológico GeoMinero, España.