

Perfeccionamiento de los trabajos de perforación y voladura en la empresa Al Baraka

Alfonso Alogo Nguema Mozoho

anguema@ismm.edu.cu

Universidad de Moa (Cuba).

Resumen: Se perfeccionó el pasaporte de perforación y voladura en la cantera Al Baraka para racionalizar el uso de los explosivos, disminuir la presencia de repié, la mala conformación del paramento y el porcentaje de pedazos de sobre-medida. Los indicadores propuestos parten del análisis de diferentes metodologías de cálculos como la de Otaño, de López, de Konya y de Langefors y Kihlstrom. Se consideró la metodología de cálculos de Otaño como la más idónea a los requerimientos de esa investigación. El patrón propuesto permite alcanzar pedazos de rocas dimensionados, pisos nivelados y paramentos regulares y estables.

Palabras clave: pasaporte de perforación; sustancia explosiva; explotación; perforación y voladura.

Trabajo tutorado por el Dr. Gilberto Sargentón Romero.

Recibido: 12 enero 2020/ Aceptado: 27 febrero 2020

Improvement of drilling and blasting work at Al Baraka

Abstract: The drilling and blasting passport in the Al Baraka quarry was perfected to rationalize the use of explosives, reduce the presence of spare parts, the bad conformation of the wall and the percentage of over-measured pieces. The proposed indicators are based on the analysis of different calculation methodologies such as Otaño, López, Konya and Langefors and Kihlstrom. The Otaño calculation methodology was considered as the most suitable to the requirements of that investigation. The proposed pattern allows to reach pieces of sized rocks, level floors and regular and stable walls.

Key words: punching passport; explosive substance; exploitation; performance and value.

Introducción

La perforación y voladura, por su importancia económica y material, ha constituido un escenario de opiniones, propuestas e intervenciones, tanto desde una perspectiva teórica como práctica.

Bernaola, Castilla y Herrera (2013) opinan que la fragmentación por perforación y voladura es la disposición de un grupo de barrenos, en los que se coloca una cierta carga de explosivo y se inicia con una secuencia tal que se consiguen los resultados de fragmentación y desplazamiento deseado, sin afectar a elementos ajenos a la misma.

Zhan (2016) propone la introducción del aire en la carga de los taladros, pues, eso daría más cobertura explosionadora y aumentaría, de forma considerable, el efecto rompedor del explosivo a tal efecto.

En Guinea Ecuatorial las labores de perforación y voladura se inician y cobran más importancia con el plan que trazó el gobierno de mejorar la infraestructura en todos los puntos de la geografía nacional.

En el país se llevan a cabo diferentes investigaciones que se han basado en la búsqueda de la mejora en cuanto a las labores de perforación y voladura. Eyene (2013) afirma que es racional llevar la explotación de la cantera por el método de perforación y voladura, y propone un pasaporte con la finalidad de disminuir el gasto de la sustancia explosiva y evitar la fragmentación secundaria.

Mitogo (2014) diseña un pasaporte de perforación y voladura teniendo en cuenta las propiedades de la roca y las propiedades de las sustancias explosivas en la cantera de Bindung, con ello llegó a la obtención de pedazos menores.

La isla de Bioko es subrayada como unas de las regiones más ricas en materias primas desde las prospecciones realizadas en 1996 por la compañía americana *United*

Meridian Corporation (UMC), donde aseguraron que en la isla abundan recursos como petróleo, azufre, aluminio, entre otros.

Las empresas que realizan sus labores de extracción de áridos al sur de la ciudad, en particular la empresa Al Baraka, reflejan en sus pasaportes el cálculo inapropiado de los indicadores de voladura. Existe un solo pasaporte de perforación y voladura en todos los frentes que toma poco en consideración las propiedades físico-mecánicas de la roca, las condiciones hidrogeológicas de los frentes de arranque, las condiciones geólogos-estructurales de los macizos, la falta o la sobra de las sustancias explosivas debido a la desactualización del único pasaporte existente, entre otros aspectos.

Este trabajo propone perfeccionar los trabajos de perforación y voladura en la empresa Al Baraka para racionalizar el uso de los explosivos, disminuir la presencia de repié, la mala conformación del paramento y el porcentaje de pedazos de sobre-medida.

Planteamiento de los cálculos para el arranque por perforación y voladura en la cantera Al Baraka

Las teorías para el cálculo de un correcto pasaporte de perforación y voladura a cielo abierto con el objeto de fragmentar las rocas se fueron evolucionando gracias a las distintas metodologías y ecuaciones propuestas por investigadores como Langefors y Kihlstrom (1963), Konya (1983), López (2003) y Otaño (2014).

Se consideró la metodología de Otaño (2014) para los cálculos del pasaporte de perforación y voladura por ajustarse más a los requerimientos de esta investigación.

Caracterización del macizo rocoso de la cantera Al Baraka

La cantera Al Baraka se caracteriza por estar en las zonas de mayor compactación (dureza) de las rocas basálticas que se encuentran en toda la isla. Empezó sus labores desde 2003. No se estima una fecha para un posible cierre de la cantera.

Tiene dos frentes de arranque, el primero con una extensión de seis hectáreas y el segundo de ocho hectáreas. Se ubica al sur de la ciudad de Malabo, con una altura sobre el nivel del mar de 692 m (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de la cantera Al Baraka.

Determinación de las propiedades físico-mecánicas del basalto que se explota en la cantera de Al Baraka

Los resultados de las propiedades físico-mecánicas del basalto se determinaron en el laboratorio de la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (UNGE)* y en la misma empresa Al Baraka. Las Tablas 1 a 5 muestran las propiedades físico-mecánicas de la roca basáltica determinadas en el laboratorio de la UNGE.

Tabla 1. Determinación de la humedad

Identificación de la muestra	Peso de la muestra húmeda (g)	Peso de la muestra seca 1 (g)	Peso de la muestra seca 2 (g)	Peso de la muestra seca constante (g)
M ₁	44,8	33,6	33,1	33,1
M ₂	45,1	30,3	30,0	30,0
M ₃	43,4	32,7	32,4	32,4
$W_r = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \%$		$W_r = 39,5 \%$		

Donde:

M_h – Masa de la muestra húmeda, g

M_s – Masa de la muestra seca, g

Tabla 2. Determinación de la porosidad

Identificación de la muestra	Volumen total de la muestra (cm ³)	Volumen de la parte sólida de la muestra (cm ³)	Volumen que ocupan los poros (cm ³)
M ₁	60,8	17,2	40,0
M ₂	50,3	8,6	38,3
M ₃	58,2	14,6	39,1
$P = \frac{V - V_s}{V} = \frac{V_p}{V} \cdot 100 \%$		$P = 6,73 \%$	

Donde:

V - volumen de roca, cm³

V_s - volumen de la parte sólida de la muestra, cm^3

V_p - volumen que ocupan los poros, cm^3 .

Tabla 3. Determinación de la masa volumétrica por pesada hidrostática

Identificación de la muestra	M _{sp} (g)	M _{cp} (g)	M _{sa} (g)	M _m (g)	V _{cp} (cm^3)	V _{sa} (cm^3)	V _m (cm^3)	γ_v (g/cm^3)
M ₁	21,3	21,9	7,5	0,6	14,4	0,56	13,84	0,043
M ₂	14,7	15,2	6,1	0,5	9,1	0,46	8,64	0,058
M ₃	16,3	16,6	5,4	0,3	11,2	0,28	10,92	0,028
$\gamma_v = \frac{M_m}{V_m} = \gamma_v = 0,12 \text{ g}/\text{cm}^3$								

Donde:

M_m - masa de la muestra, g

V_m - volumen de la muestra, cm^3 .

Tabla 4. Determinación del peso específico húmedo

Identificación de la muestra	W _r (g)	V (cm^3)	$\gamma_d = \frac{W_r}{v}$
M ₁	41,3	15,5	2,66
M ₂	39,6	14,3	2,76
M ₃	40,4	15,5	2,60
M ₄	40,0	13,4	2,98
M ₅	39,1	14,8	2,65
Promedio	40,0	14,7	2,73 g/cm^3

Donde W_r – peso de la roca, g.

Tabla 5. Determinación del peso específico seco

Muestras	W _r (g)	V (cm^3)	$\gamma_f = \frac{W_r}{v}$
M ₁	30,1	11,9	2,52
M ₂	28,4	11,5	2,46
M ₃	29,8	10,7	2,78
M ₄	30,7	11,0	2,79
M ₅	29,0	12,3	2,35
Promedios	29,6	11,48	2,58 g/cm^3

En la Tabla 6 se muestran todos los resultados de las propiedades físico-mecánicas alcanzados en esta investigación, tanto en la empresa Al Baraka, como en el laboratorio de la *Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (UNGE)*:

Tabla 6. Resultados de las propiedades físico-mecánicas del Basalto

Tipo	Volcánica, ígnea, extrusiva
Humedad	39,5 %
Dureza	6 muy dura
Porosidad	6,73 %
Densidad	2,7 g/cm^3

Masa volumétrica	0,12 g/cm ³
Peso específico húmedo	2,73 g/cm ³
Peso específico seco	2,58 g/cm ³
Resistencia a compresión	141,5 Mpa
Fortaleza	14,15
Categoría de agrietamiento	III
Distancia media entre grietas	0,7 m
Textura	Áspera, vesicular, fino, vidrio, etc.

Procesos tecnológicos de explotación de la empresa Al Baraka

La Figura 2 muestra el orden en que se realizan dichas labores en la cantera en Al Baraka:

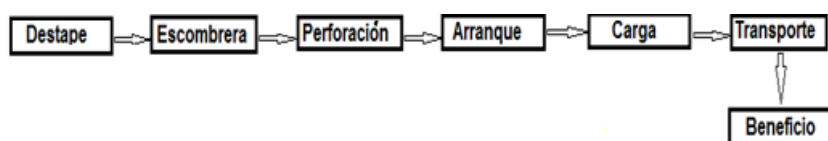


Figura 2. Tecnología de explotación de Al Baraka.

Capacidad de producción de la cantera

La producción diaria entre las tres capacidades de los camiones es de 840 m³. En la Tabla 7 se muestran los resultados de la producción en la cantera.

Tabla 7. Producción de la cantera (Fuente Al Baraka)

Tiempo	Cantidad
Diaria (8 h)	840 m ³
Semanal (lunes-sábado)	5 040 m ³
Mensual (26 días)	21 840 m ³
Anual (312 días)	262 080 m ³

Parámetros de los frentes de arranque en la cantera Al Baraka

La Tabla 8 muestra los parámetros del frente de arranque de la cantera Al Baraka.

Tabla 8. Parámetros del frente de arranque

Extensión de la cantera	14 hectáreas
Longitud del frente	63 m
Altura máxima de la cantera	12 m
Anchura de la plataforma	17 m
Angulo de talud laboral	83°
Altura del 1° escalón (paramento laboreado)	5 - 7 m
Altura del 2° escalón (paramento laboral)	5 m

Equipos y herramientas que intervienen en la actividad de la voladura

- Dos máquinas perforadoras, para la perforación de los taladros.
- Un coche (Dina), para la carga de explosivos y el personal hacia el frente.

- cuatro a cinco cuchillos para abrir los sacos de nitrato de amonio.
- Un camión para mezclar nitrato de amonio con el combustible.
- doce a quince cubos para la carga del explosivo hacia los taladros.
- dos mangueras, también para la carga del ANFO en los taladros.
- diez rollos de cinta aislante para la conexión del cordón detonante y detonadores.

Caracterización de la tecnología de perforación y voladura utilizada en la empresa de Al Baraka

La ejecución de las labores de perforación y voladura se realiza en el orden siguiente: perforación de los taladros, determinación de las mallas, preparación de las sustancias explosivas (generalmente el ANFO, porque el Booster Gel viene ya encartuchado), carga de los taladros, conexión de las mallas, comprobación del circuito y, por último, la detonación de los taladros.

Tecnología de perforación utilizada en la empresa Al Baraka

En la cantera la perforación de los taladros tiene las siguientes dimensiones: un diámetro de 87 mm, la profundidad de taladros varía entre 6-6,5 m y con una inclinación de 83°.

Para la realización de esta actividad en la cantera se utiliza la máquina perforadora de marca **Sandvik DX700**, máquina perforadora con un mecanismo de trabajo de percusión-giro; se utiliza en la perforación de rocas con fortaleza alta y media.

Tiempo de perforación

La perforación de taladros se realiza días antes de la voladura, la perforación dura 15 minutos por taladro y, para todo el frente de arranque (que comprende una voladura), dura 4 días, siendo así la actividad que más tiempo consume durante su realización.

El número total de los taladros en todas las voladuras presenciadas por el investigador osciló entre 110–120 taladros.

Sustancias explosivas y los accesorios utilizados por la empresa Al Baraka

La empresa Al Baraka utiliza como explosivos el ANFO, combinado con el Booster Gel, y como accesorios: cordón detonante, comprobador, detonadores eléctricos, un cable eléctrico, el explosor, entre otros. El ANFO es la mezcla de nitrato de amonio (AN) con el combustible (FO); sus características se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Características del ANFO

Combinación (Mezcla)	AN-FO
Ecuación de reacción	$\text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O} + 3\text{N}_2$
Calor de explosión	929,11 kcal/kg
Velocidad de detonación	3 000 – 4 500 m/s
Volumen de gases	1,056 L/kg
Presión de detonación	30 Kbar
Densidad	840 kg/m ³
Masa volumétrica	690-750 kg/m ³
Energía efectiva	2,3 MJ/kg

Nitrato de amonio: es una sal formada por iones de nitrato y de amonio. Se trata de un compuesto incoloro, altamente soluble en agua, no inflamable (Tablas 10 y 11).

Tabla 10. Propiedades físicas de nitrato de amonio

Densidad	1 720 kg/m ³ ; 1,72 g/cm ³
Masa molar	80 g/mol
Punto de fusión	442 K (169 °C)
Punto de ebullición	483 K (210 °C)
Punto de descomposición	483 K (210 °C)
Apariencia	Sólido blanco

Tabla 11. Propiedades químicas de nitrato de amonio

Solubilidad en agua	190 g/100 ml (20 °C)
Momento dipolar	O D

Cálculo del balance de oxígeno de NH_4NO_3

$$Bo = \frac{[d - (2a + 0,5b + \frac{X}{Y}E)]16}{M} \times 100$$

Donde:

Bo - balance de oxígeno

16 - masa atómica de oxígeno

M - masa molecular de la sustancia explosiva

E - moles de metal que entran en la composición de la sustancia explosiva

X - n° de átomos de oxígeno que necesita el metal para su oxidación completa

Y - n° de átomos de metal en su óxido superior

d - n° de átomos de oxígeno

a - n° de átomos de carbono

b - n° de átomos de hidrógeno

Bo = 40 %

El Booster Gel: es una carga explosiva encartuchada de pentolita (mezcla de TNT y PETN), que actúa como sustancia iniciadora de explosión de otros explosivos industriales. Sus características se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Característica del Booster Gel

Densidad	1,2 kg/dm ³
Longitud	0,6 m
Diámetro	Hasta 70 mm
Peso	2,4 kg
Volumen de gases	692 L/kg
Velocidad de detonación	7,200 + 3 % m/s

Análisis de los principales indicadores de los trabajos de perforación y voladura en la cantera Al Baraka

- **Línea de menor resistencia**, no se toma en consideración lo que conduce a no lograr una superficie estable del paramento del escalón; además, les genera que los gases del ANFO se disparen a una velocidad alta hacia el frente libre y los fragmentos de roca se expanden de forma incontrolada hacia sitios colindantes.
- **Profundidad de los taladros**, diferencias de profundidades, unos a 6 m, otros hasta 6,5 m. Causa el desgaste de la máquina perforadora dado que la perforación se realiza en una de las rocas con mayor fortaleza del mundo.
- **Diámetro de los taladros**, se utiliza un diámetro de 87 mm, dejando hasta 14 mm de holgura en la carga del material explosivo, lo que les ocasiona mayor gasto de sustancia explosiva.
- **Longitud de sobre-perforación**, no se tiene en cuenta y eso les produce la formación del repié en el piso del frente de arranque.
- **Longitud de relleno**, no se considera, esa longitud por lo general se toma al azar, y eso les causa la baja productividad del explosivo.
- **Radios de seguridad de las personas y de los equipos**, no se calcula, se hace como un experimento por cada voladura.
- **Esquema de voladura**, casi siempre en serie o se utiliza un esquema en paralelo o la combinación de ambas. La línea de tiro se crea en uno de las esquinas de la malla, lo que ocasiona que los pedazos de rocas salgan con un diámetro no requerido y, luego tengan que hacer una fragmentación secundaria.

Perfeccionamiento de la tecnología de los trabajos de perforación y voladura en Al Baraka

Evaluación de las sustancias explosivas

En la evaluación de las sustancias explosivas se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Precios y características de las sustancias explosivas.
- El costo de la misma actividad de la voladura.
- Las propiedades físico-mecánicas de la roca basáltica que se encuentra en el frente de arranque de la cantera Al Baraka.
- Las características geólogos-estructurales del macizo rocoso explotado por la empresa Al Baraka.

Determinación de los parámetros más racionales de las voladuras en la cantera Al Baraka

Para la determinación de esos parámetros se valoraron dos factores fundamentales: el coeficiente de fortaleza de la roca basáltica que se encuentra en el frente arranque de Al Baraka y la producción horaria que necesita la cantera.

Longitud del taladro

Para su determinación se consideraron detalles como la fortaleza y dureza de la roca, las características de la máquina perforadora (Sandvik DX700) y las condiciones geológica-estructurales del macizo.

Diámetro de los taladros

Según las propiedades físico-mecánicas del basalto y el diámetro de los cartuchos del Booster Gel, así como el diámetro que toma el ANFO cuando es introducido dentro de los plásticos (en algunos casos) y las características de la máquina perforadora (Sandvik DX700), se propuso reducir el diámetro de los taladros hasta 78 mm para aumentar la velocidad de perforación y evitar mayor gasto de sustancia explosiva.

Carga de los taladros: se determinó en tres partes que alcanzan la longitud total del taladro (Figura 3).

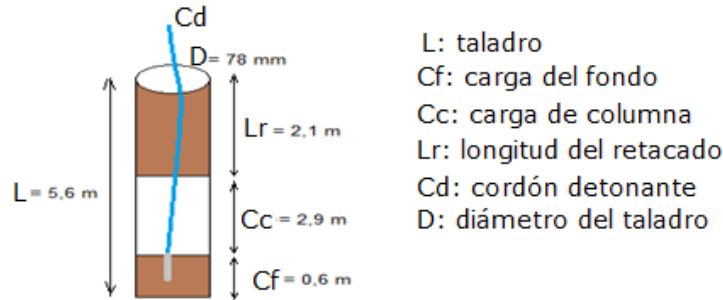


Figura 3. Carga de taladros diseñada.

Longitud de sobre-perforación (Ls): Se obtuvo una medida (0,56 m), que se precisó experimentalmente en las condiciones específicas del frente de arranque de la cantera y, tras su análisis, se pudieron mitigar las irregularidades registradas a tal efecto.

Línea de menor resistencia (w): Se definió en un contexto práctico del frente de la cantera, y con él se logró el buen amontonamiento de los fragmentos de la roca (mayor productividad) y se regularizó la estabilidad del paramento (Figura 4).

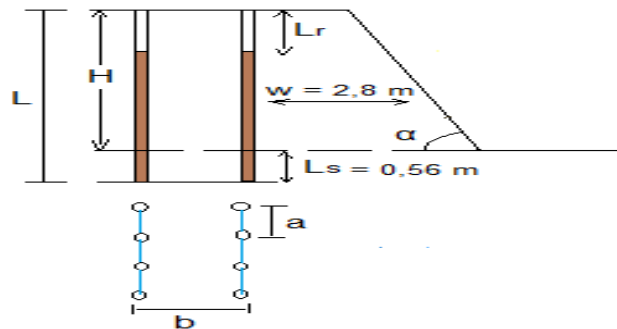


Figura 4. Línea de menor resistencia y longitud de sobre-perforación.

Esquema de voladura planteado: se planteó un esquema de taladros en serie y paralelo, con la línea de tiro conectado en los dos extremos, donde las ondas expansivas parten de los dos lados equitativamente. El arranque se produce de forma secuencial, desde los extremos hacia el interior del frente, logrando menor retardo, pedazos dimensionados y menor expansión de las rocas (Figura 5).

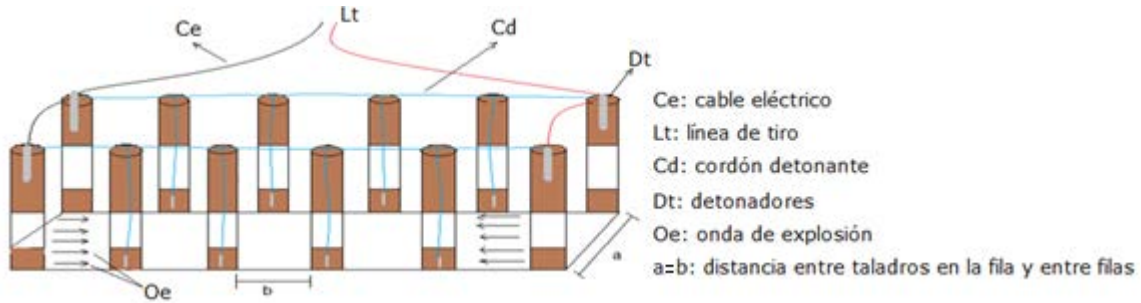


Figura 5. Esquema de voladura planteado.

Grado de retardo entre taladros en fila y filas: se producirá desde un extremo hacia el interior del croquis, de fila en fila (a), hasta chocarse en el medio con la otra secuencia de las ondas explosivas que parte del otro extremo en el sentido opuesto.

Radio de seguridad entre el personal y la maquinaria u obras cercanas: con los cálculos efectuados acerca de ese parámetro, se pudo erradicar el peligro al que siempre se exponía el personal y la maquinaria de la empresa Al Baraka.

Propuesta del patrón de pasaporte de perforación y voladura

Se partió de dos parámetros: coeficiente de fortaleza de la roca basáltica y la producción horaria de los áridos en la cantera de la empresa Al Baraka (Otaño, 2014).

Línea de menor resistencia (W)

$$W = 53k_t d_c \sqrt{\frac{\Delta e}{\gamma}}, \text{ m}$$

Donde:

k_t – coeficiente de agrietamiento de las rocas, varía de 0,9 a 1,1

d_c – diámetro de la carga, en el caso de las S.E. sueltas es igual al diámetro del taladro y con S.E. en cartuchos es igual al diámetro del cartucho, m

Δ - densidad de la sustancia explosiva en la carga, kg/dm^3

e – coeficiente de la capacidad de trabajo de la sustancia explosiva, cm^3

γ - densidad de las rocas, kg/dm^3

$$W = 53 \times 1,1 \times 0,074 \sqrt{\frac{0,84 \times 0,036}{0,27}} = 2,8 \text{ m.}$$

Distancia entre taladros en la fila y entre filas (a = b)

$$a = b = m W, \text{ m}$$

Donde:

m - coeficiente de aproximación de cargas que varía: teóricamente varía entre 0,8 a 1,6 y prácticamente varía entre 0,9 a 1,1

$$a = b = 0,9 \times 2,8 = 2,5 \text{ m.}$$

Número de filas (Nf)

$$Nf = \frac{B}{a} + 1$$

Donde:

B – ancho de la plataforma o del frente de arranque, m

a – distancia entre taladros en filas, m

$$Nf = \frac{17}{2,5} + 1 = 7,8 \approx 8 \text{ filas.}$$

Magnitud de carga del taladro (Q)

$$Q = qv = qaWH, \text{ kg}$$

Donde:

q – gasto específico de la sustancia explosiva, kg/m³

v – volumen de la roca, m³

H – altura del banco, m

$$Q = 0,35 \times 2,5 \times 2,8 \times 5 = 12,25 \text{ kg.}$$

Longitud de sobre-perforación (Ls)

$$Ls = (0,1-0,2) W, \text{ m}$$

Donde:

$$Ls = 0,2 \times 2,8 = 0,56 \text{ m.}$$

Longitud del retacado (Lr)

$$Lr = 0,75W, \text{ m}$$

Donde:

$$Lr = 0,75 \times 2,8 = 2,1 \text{ m.}$$

Número de taladros por fila (Ntf)

$$Ntf = \frac{Lr}{b}$$

Donde:

Lf – longitud del frente, m

b - distancia de taladros en filas, m

$$N_{tf} = \frac{63}{2.5} = 25,2 \approx 26 \text{ taladros.}$$

Número de taladros total (Nt)

$$N_t = N_f \cdot N_{tf}$$

Donde:

$$N_t = 8 \times 26 = 208 \text{ taladros.}$$

Longitud de los taladros (L)

$$L = \frac{H + l_s}{\text{sen} \alpha}, \text{ m}$$

Donde:

Ls – longitud de sobre-perforación, m

α – ángulo de inclinación o del talud

$$L = \frac{5 + 0,56}{\text{sen}83} = 5,6 \text{ m.}$$

Longitud de la carga de sustancias explosivas (Le)

$$L_e = L - L_r, \text{ m}$$

Donde:

L – profundidad del taladro, m

Lr – longitud del retacado, m

$$L_e = 5,6 - 2,1 = 3,5 \text{ m.}$$

Longitud de cordón detonante (Qcd)

$$Q_{cd} = L \cdot N_f \cdot N_t \cdot K_r, \text{ m}$$

Donde:

Nt - número de taladros en fila

Kr - coeficiente de reserva 1,1

$$Q_{cd} = 5,6 \times 8 \times 26 \times 1,1 = 1\ 281,28 \text{ m.}$$

Tiempo de retardo entre taladros de la misma fila

$$T_{rt} = \sqrt{\frac{D_r}{G_e}}, s$$

Donde:

D_r – densidad de la roca, t/m³

G_e – gasto específico de la sustancia explosiva, kg/cm³

$$T_{rt} = \sqrt{\frac{0,0000027}{0,035}} = 0,093 s.$$

Radio de seguridad

$$R_s = K_c \sqrt{Q_{ct}}, m \rightarrow \text{Para las personas}$$

Donde:

K_c - coeficiente que tiene en cuenta la disposición de las cargas respecto a la superficie libre, varía entre 10 – 15

Q_{ct} - cantidad total de la sustancia explosiva explosionada simultáneamente

$$R_s = 10 \sqrt{1475} = 384,05 m$$

$$R_s = 200 \sqrt[3]{Q_{ct}}, m \rightarrow \text{Para equipos u obras}$$

$$R_s = 200 \sqrt[3]{1475} = 212 m.$$

Tiempo de la perforación de los taladros

$$T_t = \frac{N.L}{N_p.V_p}, h$$

Donde:

N – número total de taladros

N_p – número de máquinas perforadoras

V_p – velocidad media de perforación, m/h

$$T_t = \frac{208 \times 5,6}{2 \times 24} = 24,2 h.$$

Resultados del patrón de perforación y voladura diseñado

Tabla 13. Patrón de voladura diseñado

Parámetros	Símbolos	Relaciones	Resultados
Línea de menor resistencia	W	$W = 53k_c d_c \sqrt{\frac{\Delta e}{\gamma}}$	2,8 m
Distancia entre taladros en fila y entre filas	$a = b$	$a = b = m.W$	2,5 m

Número de filas	Nf	$Nf = \frac{B}{a} + 1$	8 filas
Magnitud de carga de cada taladro	Q	$Q = qv = qaWH$	12,25 kg
Longitud de sobre-perforación	Ls	$Ls = 0,1 W$	0,56 m
Longitud del retacado	Lr	$Lr = 0,75W$	2,1 m
Número de taladros por fila	Ntf	$Ntf = \frac{L_f}{b}$	26 taladros
Número total de taladros	Nt	$Nt = Nf \cdot Ntf$	208 taladros
Longitud de los taladros	L	$L = \frac{H + l_s}{\text{sen } \alpha}$	5,6 m
Longitud del explosivo por taladro	Le	$Le = L - Lr$	3,5 m
Longitud de cordón detonante por fila	Qcd	$Qcd = L \cdot Nf \cdot Nt \cdot Kr$	1 281,28 m
Tiempo de retardo entre taladros de la misma fila	Trt	$Trt = \sqrt{\frac{Dr}{Ge}}$	0,093 s
Tiempo de perforación de los taladros	Tt	$Tt = \frac{N \cdot L}{Np \cdot Vp}$	24,2 h
Radio de seguridad de los equipos u obras	Rs	$Rs = 200 \sqrt[3]{Qct}$	212 m
Radio de seguridad para las personas	Rs	$Rs = Kc \sqrt{Qct}$	384,05 m

Evaluación comparativa entre el patrón de la empresa y el patrón planteado

Tabla 14. Tabla comparativa entre el patrón de la empresa y el propuesto

Parámetros	Patrón actual	Análisis	Propuesta
Diámetro del taladro	87 mm	Desgaste de la máquina perforadora	78 mm
Línea de menor resistencia	No se tiene en cuenta	Mala formación de taludes	2,8 m
Longitud de sobre-perforación	No se tiene en cuenta	Formación del repié	0,56 m
Longitud de los taladros	6,5 m	Gasto de sustancia explosiva	5,6 m
Longitud del retacado	1 m	Menor productividad de la S.E	2,1 m
Longitud de carga del explosivo por taladro	5,5 m	Gasto de sustancia explosiva	3,5 m
Longitud de cordón detonante por fila	No se tiene en cuenta	La sobra o falta del cordón detonante	1 281,28 m
Retardo entre taladros de la misma fila	No se valora	Mayor retardo	0,093 s
Radio de seguridad para el personal	180 m	Riesgo para el personal	384,05 m
Radio de seguridad para equipos u obras	150 m	Riesgo para equipos u obras	212 m
Tiempo de perforación de taladros	32 horas	Mucha pérdida de tiempo	24,2 h
Esquema de voladura	En serie con la línea de tiro en un extremo	Mucha propagación acústica y mayor retardo	Serie y paralelo, la línea de tiro en los extremos

Conclusiones

Se determinan las propiedades físico-mecánicas de las rocas basálticas que se encuentran en las áreas de la cantera Al Baraka.

Tras implementar los cálculos y esquemas propuesto en esta investigación se logra perfeccionar una serie de indicadores, alcanzando así la obtención de pedazos dimensionados, el buen amontonamiento de las rocas voladas y una mayor productividad.

Con los nuevos planteamientos se consigue la eliminación del repié en la plataforma, la buena formación de taludes, la reducción del costo de la voladura en un mayor porcentaje; debido, entre otras cosas, a la no existencia de una voladura secundaria.

Se diseña un pasaporte de perforación y voladura en correspondencia con las propiedades físico-mecánicas de la roca, las condiciones geólogos-estructurales del macizo y las características de las sustancias explosivas. El patrón propuesto permite alcanzar pedazos de rocas dimensionados, pisos nivelados y paramentos regulares y estables.

Referencias bibliográficas

- BERNAOLA, J.; CASTILLA, J. Y HERRERA, J. 2013. *Perforación y voladura de rocas en minería*. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- EYENE, T. 2013. *Perfeccionamiento del pasaporte de perforación y voladura*. Tesis de ingeniería. Malabo.
- KONYA, G. 1983. *Manual de perforación y voladura de las rocas*.
- LÓPEZ, J. 2003. *Manual de perforación y voladura de rocas*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid.
- LANGFORS, U.; KIHLMSTROM, B. 1963: *Técnica moderna de la voladura de rocas*. Ediciones Urmo, Bilbao, España.
- MITOGO, C. 2014. *Propuesta de un pasaporte de perforación y voladura*. Trabajo de diploma. Malabo.
- OTAÑO, J. 2014: *Fragmentación de rocas con explosivos*. Félix Varela, La Habana.
- ZHANG, Z. X. 2016. *Rock fracture and blasting: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.