

Drilling grid blasting upgrading based on Geological Strength Index (GSI), case “La Maruja” mine, Colombia

Camilo Andrés Ortega-Ramos, Andrés Felipe Jaramillo-Gil & Jorge Martín Molina-Escobar

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. caaortegara@unal.edu.co, afjaram0@yahoo.es, jmmolina@unal.edu.co

Received: July 29th, 2015. Received in revised form: December 13th, 2015. Accepted: May 2th, 2016.

Abstract

Having proper rock masses characterization is of great importance in underground mining works to make the right decisions in terms of sustenance and other tasks like is the case of drilling and blasting. Here it is proposed the built of a geomechanical table based in the GSI through which to decide the drilling grid configuration applies for each rock type. This improves production cycles and explosives consumption in blasting. This table is created from experimental trials in blasting of panels with different drilling grid geometries, the ranging from 60x60cm up 80x80 cm; and the main parameter to ensure is a maximum particle size of 30 cm after the blasting with 24.6% costs reduction.

Keywords: drilling, blasting, geological stress index.

Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia

Resumen

En labores de minería subterránea es de gran importancia tener una adecuada caracterización del macizo rocoso con el fin de tomar las decisiones correctas en términos de fortificación y de otras labores, como lo es caso del arranque con perforación y voladura. Se plantea la construcción de una tabla geomecánica basada en el GSI a través de la cual se pueda tomar la decisión de que configuración de malla de perforación que a aplica para cada tipo de roca. Ello permite mejorar los ciclos de producción y consumo de explosivos en las voladuras. Dicha tabla se crea a partir de ensayos experimentales en voladuras de los paneles con distintas configuraciones geométricas de mallas de perforación que oscilan entre espaciamientos de 60x60cm y 80x80 cm; y su principal parámetro a garantizar es una granulometría máxima de 30 cm tras la voladura logrando reducir los costos en un 24,6%.

Palabras clave: perforación, voladura, índice de esfuerzo geológico.

1. Introducción

Los modelos de clasificación geomecánica de macizos rocosos son una herramienta muy importante en labores de trabajos subterráneos, en especial en minería donde los continuos cambios a los cuales está sometido éste hacen que se presenten condiciones inestables en la roca; en las cuales se vuelve necesario el uso de sistemas de fortificación que eviten el colapso de los túneles. Además de la aplicación antes mencionada, los sistemas de clasificación geomecánica pueden ser utilizados para cualquier operación donde la calidad del macizo afecte la eficiencia de ésta, como lo es el caso de la perforación y voladura de roca.

Aunque el comportamiento de un macizo rocoso es muy impredecible y complejo, este puede ser simplificado con la utilización de modelos geomecánicos [1], como por ejemplo, el índice de esfuerzo geológico (GSI), que da una clasificación de la roca bastante acertada según su calidad.

Sabiendo que aproximadamente el 85% de la energía generada por una voladura no se aprovecha en la fragmentación y que una parte de esta pasa a la roca de caja, generando así problemas de estabilidad [2]. Se recalca la importancia de tener una configuración de malla de perforación para cada tipo de roca presente en una operación subterránea que mejore granulometría, reduzca sobreexcaeciones y costos.

How to cite: Ortega-Ramos, C.A., Jaramillo-Gil, A.F. & Molina-Escobar, J.M., Modificación de las mallas de perforación de voladuras a partir del índice de esfuerzo geológico (GSI), caso mina “La Maruja”, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 32-38, 2016.

En este trabajo se utilizó la clasificación geomecánica GSI para hacer una selección de la calidad del macizo rocoso con el fin de escoger la malla de perforación adecuada para este, buscando así mejoras en rendimientos y consumo de explosivos en las voladuras de producción para el caso de la mina La Maruja, en Marmato Colombia.

La metodología se basa en una serie de ensayos en voladuras con los cuales se busca determinar qué tipo de malla de perforación se ajusta más a cada tipo de roca en diferentes paneles.

2. Marco teórico

2.1. El índice de esfuerzo geológico (GSI)

La clasificación geomecánica GSI fue propuesta por Hoek & Brown, con el fin de buscar un criterio que se pudiese aplicar de forma rápida en campo, a partir de observaciones geológicas, y se convirtió en uno de los sistemas más utilizados debido a su practicidad y confiables resultados [3].

El GSI se basa principalmente en dos parámetros para establecer una calidad de la roca, los cuales son: el Rock Quality Designation (RQD), a partir del cual se evalúa que tan fracturada esta la roca; y la resistencia a la compresión uniaxial (RCU).

Este sistema de clasificación otorga resultados más confiables cuando se trabaja con rocas de baja calidad, donde otros criterios de clasificación (como el NGI y RMR) fallan al depender en sus expresiones del valor numérico RQD (que en rocas de estas condiciones casi siempre es cero) [3]. La Fig. 1 muestra la tabla GSI propuesta por Hoek y Brown para clasificación de macizos rocosos, que compara visualmente las características del terreno; por ejemplo, si se observa una roca con una buena superficie (rugosa, ligeramente meteorizada o manchada con hierro) y una superficie fracturada (bloques formados por tres sistemas de discontinuidades), se tiene un GSI de entre 60 y 70.

El criterio de clasificación del GSI se utiliza como una herramienta de selección del tipo de malla de perforación para el arranque con voladuras adecuada para cada terreno. En el capítulo 2.3 se muestra que el principal parámetro de control en las mallas de perforación es el espaciamiento, por lo que la tabla geomecánica construida busca correlacionar el GSI con esta variable.

2.2. Geología de la zona de estudio

El proyecto minero hace parte del depósito mineral Marmato, contiene una mineralización de intrusiones de pórfidos dacíticos y andesitas porfídicas. El depósito cuenta con cinco pórfidos identificados que se diferencian sus por texturas y relaciones intersectoriales. Dichas evidencias fueron observadas a través de núcleos de perforación y a partir de la cartografía geológica [4].

El depósito ha sido descrito como un nivel profundo, un yacimiento de oro tipo epitermal con sulfuración intermedia. En las zonas con presencia de sulfuros, estos se encuentran en venas de cuarzo, calcedonia, adularia y calcita. Además se

pueden encontrar pequeñas cantidades de cobre (de 100 a 200 ppm) presentes en forma de calcopirita y en algunos casos como tetraedrita [4].

En términos geomecánicos las rocas de la formación pueden tener valores de cohesión de 280 kp/cm², alcanzando hasta 400 kp/cm² en las zonas donde se presentan calcitas menos alteradas; y valores de ángulos de fricción que oscilan entre 35 y 45°. Los valores de resistencia a la compresión simple pueden alcanzar hasta 190 MPa [5].

2.3. Mecanismos de fractura de la roca

Uno de los principales parámetros a controlar con una voladura de producción es la granulometría resultante, lo cual tiene gran influencia la configuración geométrica de la malla de perforación a utilizar [6].

Tras la detonación del explosivo la roca empieza a fracturarse por una serie de mecanismo que se van dando sucesivamente. El primero de estos es la trituración de roca que se da en los primeros instantes de la voladura, cuando la presión de la onda de choque es muchas veces mayor a la resistencia a la compresión de la roca y destruye la estructura interna de esta. Seguidamente se da un agrietamiento radial alrededor del barreno; ello se produce cuando la onda que se propaga supera la resistencia a la tracción de la roca generando una zona de grietas [7].

Cuando la onda de choque llega a una cara libre una parte se refleja contribuyendo en cierta parte al proceso global de fragmentación. Después de esto se da un proceso de extensión de las grietas radiales por parte de los gases generados en la voladura. Finalmente se da una rotura por cizallamiento, flexión y colisión de las partículas de roca [7].

Al analizar el proceso de fracturamiento de las rocas se puede decir que uno de los puntos más críticos es el agrietamiento radial generado cuando la presión de la onda vence la resistencia a la tracción de la roca. A partir de aquí es donde empiezan los mecanismos de roturas que producen la mayor parte de las fracturas.

Además en vista de que las presiones transmitidas por la onda, a medida que se ájela del barreno dependen principalmente del tipo de explosivo y el radio del barreno, es posible decir que uno de las principales variables a controlar en la configuración geométrica de las mallas es el espaciamiento de los barrenos; ya que si están muy alejados no son capaces de generar el suficiente agrietamiento radial produciendo sobretamaños.

Ahora, es posible estimar cual sería el espaciamiento máximo al cual podrían estar sometidas las mallas de perforación para voladuras de este tipo, utilizando las expresiones para mecanismos de fracturas en rocas [7]. Esta estimación parte de los cálculos de la impedancia de la roca y la presión de detonación mostradas en las ec. (1-2) respectivamente, donde se realizó el cálculo con las características del ANFO (VD=3500 m/s y $\rho_e=850$ kg/m³) que es el explosivo utilizado en las voladuras.

| INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK & MARINOS, 2000) | | CONDICIONES DE SUPERFICIE | | | | |
|--|--|--|---|---|--|--|
| <p>Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estima el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es mas real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a fallas controladas estructuralmente. Donde planos estructurales debiles estan presentes en una direccion desfavorable con respecto a la excavacion, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteracion como resultado de cambios de humedad que puede reducirse cuando el agua esta presente. Cuando trabajamos en roca regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La presion del agua es tratada por analisis de esfuerzos efectivos.</p> | | MUY BUENA | BUENA | REGULAR | POBRE | MUY POBRE |
| | | Superficie muy rugosas, no meteorizadas, frescas | Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro | Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas | Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos compactos. | Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorizacion y rellenos de arcillas suave. |
| ESTRUCTURA | | DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE → | | | | |
| | INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas | 90 | | | N/A | N/A |
| | FRACTURADA Macizo rocos con bloques enclavados, bloques cubicos formados tres intersecciones de sistemas de dicontinuidades | 80 | 70 | | | |
| | MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrabados y angulares formados por la interseccion de 4 o mas sistemas | | 60 | 50 | | |
| | FRACTURADA/PERTURBADA/SORDIDA Macizo plegado formado por bloques angulares productos de la interseccion de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificacion | | | 40 | 30 | |
| | DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados | | | | 20 | |
| | LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al debil material en los planos de esquistocidad y cizalla | N/A | N/A | | | 10 |
| | | ← DECRECE EL ENCLAVAMIENTO DE LOS BLOQUES | | | | |

Figura 1. Clasificación geomecánica GSI.
Fuente: Adaptado de [3]

$$n_z = \frac{VD \times \rho_e}{VC \times \rho_r}$$

$$n_z = \frac{3500 \frac{m}{s} * 850 \frac{kg}{m^3}}{4900 \frac{m}{s} * 2600 \frac{kg}{m^3}} \quad (1)$$

$$n_z = 0.2335$$

$$PD = \frac{VD^2 \times \rho_e}{4}$$

$$PD = \frac{(3500 \frac{m}{s})^2 \times 850 \frac{kg}{m^3}}{4} \quad (2)$$

$$PD = 2603.125 MPa$$

Y además:

Conociendo estos dos parámetros a partir de la ec. (3) se estima la presión transmitida a la roca:

$$PT = \frac{2}{1 + n_z} PD = 4220.7134 \text{ MPa} \quad (3)$$

La presión transmitida permite hallar por medio de la ec. (4) cual es el punto máximo, al cual un barreno es capaz de fragmentar la roca. Teniendo en cuenta que el RCU promedio de la roca es de 150 MPa, entonces la tensión de fracturamiento es de aproximadamente 15 MPa (el 10% del RCU).

$$\sigma_i = \left(\frac{r_b}{DS}\right)^2 PT \quad (4)$$

Entonces:

$$\left(\frac{0.037 \text{ m}}{DS}\right)^2 * 4220.7134 \text{ MPa} = 15 \text{ MPa} \quad (5)$$

Al despejar el valor de DS, se obtiene que este corresponde a 62 cm, por lo que la malla máxima de perforación sería de 120x120cm. Aunque cabe destacar que esta malla garantiza el fracturamiento, mas no la granulometría siendo lo más probable la obtención de sobretamaños tras la voladura.

Actualmente el estándar de la mina corresponde a mallas de perforación espaciadas en 60x60 cm. Aplicando la premisa anterior, con estas se obtendrían valores de tensiones de fracturamiento de alrededor de 64.19 MPa. Con ello se garantizaría un fracturamiento en la totalidad de los paneles de producción, ya que ninguna de las rocas presentes en la mina tiene valores que superen los 640 MPa de resistencia a la compresión uniaxial.

Un punto crítico de las voladuras es la inestabilidad que pueden generar en la roca de contorno tras la ejecución de esta, ocasionada por la onda como se mencionó anteriormente. La ampliación de los espaciamientos de las mallas de perforación, al disminuir el número de barrenos, también disminuye la cantidad de estos que detonan simultáneamente, disminuyendo así la vibración total generada por la cantidad menor de ondas que se superponen [8].

3. Metodología experimental

Para la construcción de la tabla geomecánica, es necesario realizar ensayos de voladuras con distintas configuraciones de mallas de perforación y en distintas calidades de rocas.

El paso inicial al llegar al panel, es realizar la caracterización geomecánica de la roca utilizando la tabla GSI. Para el cálculo del valor del RQD y del RCU se tienen aproximaciones de campo a los valores reales mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Aproximaciones de los valores del RQD y RCU.

| Medida | RCU | Medida | RQD |
|--|------------------------------------|---|--------|
| Se rompe con 3 o más golpes de martillo | Roca buena (RCU de 100 a 250 MPa) | Roca levemente fracturada (2-6 fracturas por metro). | 100-75 |
| Se rompe con 1 o 2 golpes de martillo | Roca regular (RCU de 50 a 100 MPa) | Roca moderadamente fracturada (6-12 fracturas por metro). | 75-50 |
| El martillo se inserta superficialmente | Roca pobre (RCU de 50 a 100 MPa) | Roca muy fracturada (12-20 fracturas por metro). | 50-25 |
| El martillo se inserta superficialmente más de 5mm o se disgrega | Roca muy pobre (RCU de 5 a 25 MPa) | Roca intensamente fracturada (12-20 fracturas por metro). | 25-0 |

Fuente: Autores

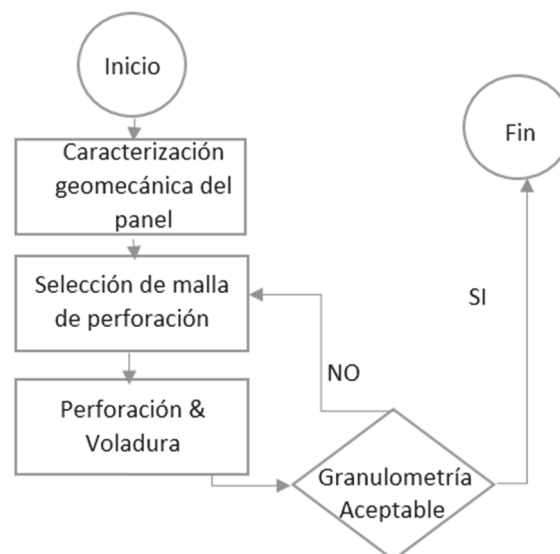


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología experimental. Fuente: Autores

Una vez caracterizada la roca, se procede a proponer un espaciamiento para la malla de perforación a realizar, se realiza la voladura y se evalúan los resultados. Esta elección se hace con base en los cálculos mostrados en el capítulo 2.3, sabiendo que no se puede exceder de mallas espaciadas de 120x120 cm.

El principal factor que determina si la malla de perforación es la indicada es la granulometría, la cual debe ser 30 cm como máximo. Otros criterios son la cantidad de sobretamaños y la forma en la cual quedó el techo y los respaldos del panel. La Fig. 2 resume la metodología utilizada para el trabajo.

4. Resultados y discusión

La metodología planteada en el capítulo 3 se aplicó en voladuras de nueve paneles de producción con distintas calidades del macizo rocoso.

Tabla 2.

Ejemplo de granulometría con sobretamaños y granulometría adecuada.

| Panel Fig. 3a tras voladura (sobretamaños) | | Panel Fig. 3b tras voladura (granulometría adecuada) | |
|--|------------|--|------------|
| Tamaño | Porcentaje | Tamaño | Porcentaje |
| 80cm < | 10 % | 10cm < | 10 % |
| 80 m – 60 cm | 20% | 10 cm – 5 cm | 30 % |
| < 60 cm | 70% | < 5 cm | 60 % |

Fuente: Autores

Tabla 3.

Paneles de producción con las configuraciones utilizadas en cada uno.

| Panel | Malla de Perforación |
|---------------------------------------|----------------------|
| Panel Microscop | 80x80 cm |
| Panel intermedia Norte Flanco E | 70x70 cm |
| Panel intermedia Norte Flanco W | 80x80 cm |
| Panel Veta 1 | 80x80 cm |
| Panel Mellizos Norte Flanco E | 80x80 cm |
| Panel 570 Flanco E | 80x80 cm |
| Panel 570 Flanco W | 80x80 cm |
| Panel 1 Este Tensional Ovejo Flanco E | 80 x 80 cm |
| Panel 1 Este Tensional Ovejo Flanco W | 80 x 80 cm |

Fuente: Autores

Para los ensayos se utilizaron tres distintas configuraciones de mallas de perforación: Espaciamientos de 60x60 cm, espaciamientos de 70x70 cm y espaciamientos de 80x80 cm, con barrenos de longitudes de 1.80 m. Luego de cada voladura se verifica el principal parámetro de control que es la granulometría, la cual debe ser máximo de 30cm para que pueda pasar por las parrillas que conducen a las tolvas de los paneles.

A modo de comparación la Fig. 3a muestra un panel con roca de calidad media en el cual tras la voladura se obtuvieron alrededor de un 40% de sobretamaños que oscilaban los 50 cm. La Fig. 3b por el contrario muestra un panel donde se obtuvo una granulometría que cumple con las condiciones anteriormente dichas, donde se puede observar que más del 60% del material está alrededor de 5 cm. La Tabla 2 muestra los resultados de granulometría obtenidos de estos dos casos.

La Tabla 3 muestra las configuraciones utilizadas para cada panel donde se realizaron ensayos, estos paneles fueron ubicados en la tabla geomecánica del GSI previamente para conocer su calidad, y tras varios ensayos se encontró cual es la configuración que mejor actúa en ellos.

Con base en estos resultados se creó la tabla GSI modificada para perforación y voladura mostrado en la Fig. 5, el cual consta de 3 zonas. La zona A, son las rocas de mejor calidad que pueden encontrarse en los paneles de la mina, son rocas duras y poco fracturadas; en esta zona la malla sigue igual que la estándar de la mina que es la espaciada de 60x60 cm, ya que los resultados con mallas más amplias fueron con gran cantidad de sobretamaños. La zona B, corresponde a los paneles con rocas de calidad media, normalmente se observa roca dura pero levemente fracturada; en estos casos las voladuras de 80x80cm trabajaron bien, pero la granulometría obtenida era levemente mayor a la requerida (fue de 40cm en promedio), por lo cual se fijó la malla en 70x70 cm para los

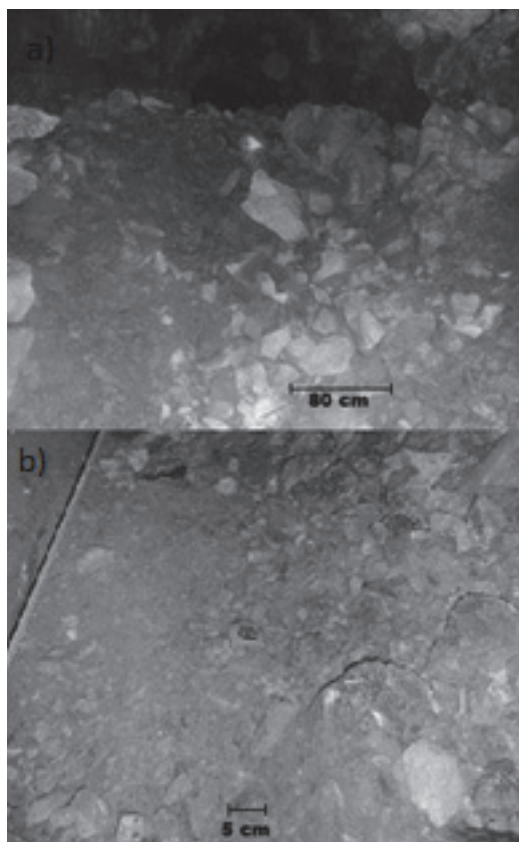


Figura 3. a) Panel luego de voladura con sobretamaños. b) Panel luego de voladura con granulometría adecuada.

paneles de este tipo. Finalmente la Zona C, corresponde a los paneles con rocas de baja calidad, en estos las mallas espaciadas a 80x80 cm fueron bastante efectivas, dejando granulometrías bastante finas, como las observadas en la Figura 3b.

En la mayoría de los paneles de producción, cuando son estrechos (menos de 1.50 m de espesor) se perforan 3 barrenos por filas. Allí se utiliza las tres zonas de la tabla geomecánica. En los resultados de los ensayos experimentales se observó que las mallas espaciadas de 80x80 cm funcionan de forma efectiva, entregando buenas granulometrías, en todos los tipos de roca siempre y cuando el ancho del panel de producción sea mayor a 1.50 m. Ello se debe a que en estos paneles se perforan más de 3 barrenos por fila y la superposición de ondas de los que detonan simultáneamente favorece al fracturamiento.

La modificación del estándar de perforación a espaciamientos de 70x70cm y 80x80cm en la mayoría de los paneles disminuye en gran medida el consumo de explosivos, debido a la disminución en la cantidad de barrenos a perforar. Ello mismo también repercute en una disminución en los tiempos de perforación y otros consumibles como brocas y barrenas.

El consumo específico de explosivos (Q), es una medición que lleva el costo de todos los agentes de voladuras y accesorios a un solo parámetro, que en este caso son los kilogramos con base en Indugel por cada tonelada de mineral

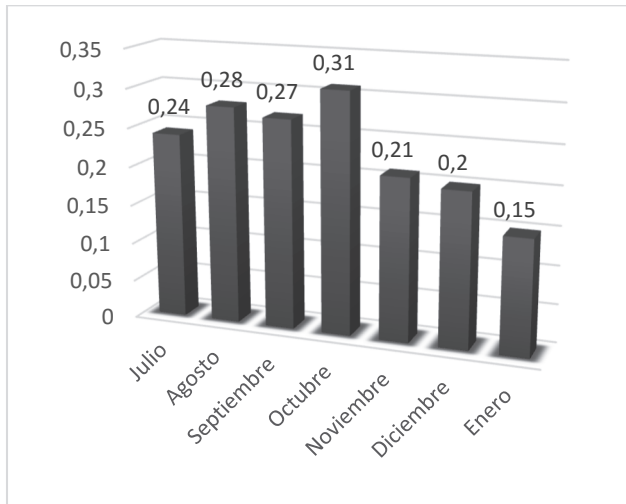


Figura 4. Consumo de explosivos Q (Kg explosivo / tonelada arrancada) histórico en Producción 2 Mina La Maruja. Final del 2014 e inicio del 2015
Fuente: Autores

arrancada; este factor puede medirse incluyendo el costo de los accesorios de voladura (detonadores, cordón, etc.) así como sin estos.

Inicialmente los ensayos se realizaron en el departamento de Producción 2, por lo cual es el único que actualmente utiliza la tabla GSI modificada. La Fig. 4 muestra cómo ha sido el comportamiento del Q sin accesorios a partir de la implementación de ésta (Noviembre de 2014).

En términos de costos netos por voladura también se encontró una reducción notable, habiendo una diferencia de 24,6% entre las mallas de 60x60cm y las de 80x80cm, como se observa en la Tabla 4.

Los costos de la Tabla 4 se refieren a una voladura de producción en el techo de un panel estándar de dimensiones de 35m x 1.5m de largo y ancho respectivamente. Allí se incluyen los costos de explosivos, accesorios de voladura, barrenas, aire comprimido y mano de obra empleada.





| MINEROS NACIONALES S.A.S - MINA MARMATO CALDAS | | | | | |
|---|---|--|---|---|----------------------------------|
| Malla de perforación según tabla GSI Modificado para Marmato en paneles de producción | | | | | |
| <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: flex-start;"> <div style="margin-bottom: 5px;"> A Malla de perforación de 60x60 para anchos menores a 1.50 m y de 80 x80 para anchos de paneles mayores a 1.50 m </div> <div style="margin-bottom: 5px;"> B Malla de perforación de 70x70 para anchos menores a 1.50 m y de 80 x80 para anchos de paneles mayores a 1.50 m </div> <div> C Malla de perforación de 80x80 </div> </div> | | | | | |
| ESTRUCTURA | CONDICIONES | Buena (Muy resistente, Fresca) | Regular (Resistente, Levemente alterada) | Pobre (Moderadamente resistente, Leve a moderadamente alterada) | Muy Pobre (Blanda, Muy alterada) |
|  <p>Levemente fracturada Tres a menos sistemas de discontinuidades muy espaciadas entre sí. (RQD 75 - 90 Jn) (2 a 6 Fracturas por metro) (RQD = 115 - 3.3 Jn)</p> | Buena (Muy resistente, Fresca) Superficie de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas. (Rc 100 a 250 Mpa) (Se rompe con tres o mas golpes de la barra) | Regular (Resistente, Levemente alterada) Discontinuidades rugosas, levemente alterada, manchas de oxidación, ligeramente abierta. (Rc 50 a 100 Mpa) (Se rompe con uno o dos golpes de la barra) | Pobre (Moderadamente resistente, Leve a moderadamente alterada) Discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta (Rc 50 a 100 Mpa) (Se inserta superficialmente con un golpe de la barra) | Muy Pobre (Blanda, Muy alterada) Superficie pulida o con estrías, muy alterada, relleno compacto o con fragmentos de roca. (Rc 5 a 25 Mpa) (Se inserta mas de 5 mm o se desgrega con un golpe de la barra) | |
|  <p>Moderadamente fracturada Muy bien trabada, No disturbada, Bloques cubicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75 Jn) (6 a 12 Fracturas por metro)</p> | | | | | |
|  <p>Muy fracturada Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por cuatro o mas sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50 Jn) (12 a 20 Fracturas por metro)</p> | | | | | |
|  <p>Intensamente fracturada Plegamiento y fallamiento, con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 0 - 25 Jn) (Mas de 20 Fracturas por metro)</p> | | | | | |

Figura 5. GSI modificado para perforación y voladura en la Mina La Maruja.
Fuente: Autores

Tabla 4.
Costo neto por voladuras.

| Malla de perforación | Costo por voladura |
|----------------------|--------------------|
| 60x60cm | \$ 1.861.902,93 |
| 70x70cm | \$ 1.601.125,20 |
| 80x80cm | \$ 1.402.934,12 |

Fuente: Autores

5. Conclusiones

- Se pueden utilizar las mallas de perforación con espaciamentos máximos de 80x80cm. No obstante al analizar la tabla geomecánica es muy probable que los paneles con rocas de la más baja calidad puedan trabajar con espaciamentos mayores, ya que como se observó en estos el tamaño promedio de la roca tras la voladura es por lo menos cinco veces menor que el requerido.
- Con mallas de 80x80cm se tiene un ahorro en costos de más del 30% que cuando se usaban mallas de 60x60cm.
- Además del espaciamiento existen ciertos factores que pueden favorecer la eficiencia de las voladuras, como lo son la variación en la cantidad de explosivo en los barrenos y las secuencias de detonación de estos (por ejemplo detonaciones en “V”). Estos parámetros también pueden traer beneficios en la granulometría, a menores afectaciones a la roca encajante y costos entre otros, por lo cual sería recomendable estudiar.

Agradecimientos

Los autores expresan su profundo agradecimiento a la empresa Mineros Nacionales S.A.S, en especial a su presidente Dr. Gabriel Gaviria, por permitir y promover estas investigaciones.

Referencias

- [1] Hoek, E. and Brown, E., *Underground Excavations in Rock*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527 P.
- [2] Mohammadi, M., Hossaini, M.F., Mirzapour, B. and Hajiantilaki, N., Use of fuzzy set theory for minimizing overbreak in underground blasting operations – A case study of Alborz Tunnel, Iran. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(3), pp. 439-445, 2015. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.03.018
- [3] Marinos, V., Marinos, P. and Hoek, E., The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), pp. 55-65. 2005. DOI: 10.1007/s10064-004-0270-5
- [4] Medoro Resources LTD., Mineral resource estimate of Marmato project, Colombia. SRK Consulting Engineers and Scientist, Toronto, Canadá, 2011, 158 P.
- [5] de Vallejo, L.G., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. *Ingeniería Geológica*, Ed. Pearson Educación, Madrid, España, 2002, 744 P.
- [6] Wyllie, D. and Mah, C. *Rock Slope Engineering: Civil & Mining*, 4th ed., New York, 2004, 431 P.
- [7] Lopez, C. y Lopez, E. *Manual de perforación y voladuras en roca*, IGME, España, 2003, 541 P.
- [8] Chen, M. and Lu, W., Blasting vibration criterion for a rock-anchored beam in an underground powerhouse, *Tunneling and Underground*

Space Technology, 22, pp. 69-79, 2007. DOI: 10.1016/j.tust.2006.03.005

CA. Ortega-Ramos, es Ing. de Minas y Metalurgia en 2015 de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Actualmente trabaja en Mineros Nacionales S.A.S. en minería aurífera subterránea. ORCID: 0000-0003-4047-2195

A.F. Jaramillo-Gil, es de Ing. de Minas y Metalurgia en 2006 de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia y Esp. en Gerencia de Proyectos en el 2010, de la Universidad del Tolima, Colombia. Actualmente trabaja en Mineros Nacionales S.A.S. en minería aurífera subterránea. ORCID: 0000-0001-7653-1586

J.M. Molina-Escobar, es Dr. en Recursos Naturales y Medio Ambiente en 2008 de la Universidad Politécnica de Cataluña, España, MSc. en Ingeniería de Geosistemas en 1997 de la Universidad de Tokio, Japón, Inge. de Minas y Metalurgia en 1989 de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Laboró en minas de oro, de carbón; consultor investigador. Actualmente profesor de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-6068-2571