

Evaluación físico-mecánica y estructural del macizo gnéisico de mina Catoca para el diseño de voladuras

Physical-mechanical and structural evaluation of the Catoca gneissic massif for designing blasting

Nunes Filipe¹, José A. Otaño-Noguel², Roberto L. Watson-Quesada³

¹Ingeniero de minas. Escuela Superior Politécnica de Lunda-Sur, Angola, nfilipe@outlook.pt

²Dr. C. Profesor Titular. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba
joseot@ismm.edu.cu

³Dr. C. Profesor Titular. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba
rwatson@ismm.edu.cu

Resumen

Por su importancia e influencia en el diseño de los trabajos de voladura, tomando en consideración la acción de la explosión en el medio, en este trabajo se determinan las principales propiedades físico-mecánicas de las rocas encajantes y se analiza la estructura del macizo, constituido por gneises, en la mina Catoca. La densidad, masa volumétrica, límite de resistencia a compresión simple estática, límites de resistencia a tracción estática y velocidad de las ondas elásticas longitudinales fueron las propiedades determinadas en el macizo; en el caso del estudio estructural, con el empleo del método geológico, se realizó el levantamiento de los sistemas y familias de grietas. Como resultado se ofrecen los valores de las propiedades antes citadas y la caracterización de los diferentes sectores de la mina, según sus propiedades y agrietamiento, aspectos de capital importancia para el diseño de las voladuras de las rocas de caja.

Palabras clave: voladura de minas; propiedades físico-mecánicas; agrietamiento de roca; gneises; mina Catoca

Abstract

Due to its importance and influence in the design of the blasting works taking into consideration the action of the explosion in the environment, in this work the main physical-mechanical properties of the embedding rocks are determined and the structure of the massif, constituted by gneisses, is analyzed at the Catoca mine. The density, volumetric mass, limit of resistance to simple static compression, limits of resistance to static traction and velocity of the longitudinal elastic waves were the properties determined in the massif; In the case of the structural study, with the use of the geological method, the systems and families of cracks were surveyed. As a result, the values of the aforementioned properties and the characterization of the different sectors of the mine according to their properties and cracking are offered, aspects of capital importance for the design of the blasting of the box rocks.

Keywords: blasting of mines; physical-mechanical properties; rock cracking; gneisses Catoca mine.

1. INTRODUCCIÓN

Localizada a unos 30 km de la ciudad de Saurimo, en la provincia de Lunda-Sur, la mina Catoca ocupa un área de 64 ha dentro del escudo Cassai, donde se conocen más de 70 chimeneas agrupadas en cuatro campos: Camafuca-Camazamba (19 chimeneas), Camútue (15 cuerpos), Camagia (8 cuerpos) y Catoca (32 cuerpos). Esta última se encuentra en la margen derecha del río Chicapa, que corre según una falla extensional NE-SW del Cretácico (Neves y Guardado 2012).

La cantera está proyectada para un minado a cielo abierto, con el arranque directo y carga de la masa minera, con excavadoras de 5 a 18 m³ de capacidad. En el caso de las rocas de destape que rodean el kimberlito (los gneises) el arranque se realiza mediante voladura; se emplean los mismos equipos para la carga y el transporte se realiza en camiones de 40-100 toneladas y en bandas transportadoras de hasta 2,5 km. Los parámetros de explotación se reflejan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de explotación establecidos en la mina Catoca

PARÁMETRO	VALOR
Altura de los bancos de trabajo, (m)	5 - 10
Altura de los bancos provisionales no operacionales, (m)	10 - 30
Angulo de inclinación de los bancos duplos, (grado)	35
Angulo de inclinación de los bancos triplos, (grado)	30
Largo de los frentes de trabajo, (m)	30 - 60
Ancho de las plazoletas de transporte y de seguridad, (m)	20 - 30

La necesidad de determinar las propiedades físico-mecánicas y estructurales del macizo de rocas gnésico parte del hecho de que durante el arranque de las rocas, el cual se realiza mediante trabajos previos de perforación y voladura, se produce un considerable volumen de fragmentos con dimensiones superiores a las admitidas por los eslabones posteriores de la cadena tecnológica (volumen de los fragmentos oscila entre 1,5 m³ y 8,5 m³). Esto genera la necesidad de realizar trabajos de fragmentación secundaria de los fragmentos sobredimensionados, con el consiguiente aumento del costo de producción.

En la literatura especializada sobre la fragmentación de rocas con explosivos diferentes autores como Sujanov y Kutuzov (1967) introducen coeficientes que consideran la acción de la explosión, la profundidad de colocación de las cargas, las propiedades de las rocas y el tipo de explosivo utilizado. Langefors y Kihlstrom (1963) establecen la constante **C** que relaciona la cantidad de explosivo por unidad volumétrica de roca a fragmentar. Diéguez, Otaño y Sargentón (2014) esclarecen que los parámetros de las ondas de tensión explosivas en las rocas dependen fundamentalmente de las propiedades físicas de estas y de las características de las sustancias explosivas, así como de la ubicación de la carga con respecto a la pared de la cámara.

Como se desconocen las causas que originan que, durante la voladura, en mina Catoca se obtengan fragmentos sobredimensionados, en esta investigación se pretende identificarlas para proponer un procedimiento de diseño y realización de los patrones de voladura que permita la disminución del volumen de estos fragmentos rocosos con dimensiones mayores que las admisibles.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Determinación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas

El yacimiento de kimberlito de la mina Catoca se describe petrográficamente como una formación vulcanogénica diamantífera, representada por tobas kimberlíticas, brechas tobáceas y tobas gravelíticas con intercalaciones de areniscas tobáceas, además de rocas kimberlíticas de transición del substrato del complejo vulcanogénico sedimentario. Las principales rocas encajantes son los gneises, con una composición feldespático-piroxenítica con intercalaciones de cuarcitas y esquistos cuarzo-biotíticos, que presentan diferentes grados de meteorización y desintegración, desde saprolitos hasta las variedades monolíticas más resistentes. Sus contactos con las rocas kimberlíticas son acentuados, con paredes abruptas (Neves y Guardado 2011).

Entre las fundamentales propiedades físico-mecánicas de las rocas a determinar en este estudio se consideran las siguientes:

- Densidad (ρ_0): Se estableció mediante el método picnométrico;
- Masa volumétrica (ρ): Se precisó mediante el método de la pesada hidrostática;
- Límite de resistencia a compresión simple estática [σ_c^e]: Se determinó en muestras cilíndricas de 50 x 50 mm;
- Límite de resistencia a tracción estática [σ_T^e]: Se estableció por el método de flexión, utilizando muestras rectangulares con sección transversal de 35x35 mm y longitud de 315 mm.
- Velocidad de las ondas elásticas longitudinales en muestras grandes (V_L): Se comprobó en una varilla larga y fina y en el macizo, por medio del equipo de ultrasonido Litienov, de procedencia Rusa.

En el laboratorio de geología-geotecnia de la mina Catoca se ensayaron las muestras (Tabla 2) y como no se conocía la dispersión o variación de los parámetros a estudiar para determinar el número de muestras se tomó para cada una de las propiedades un número determinado, como sigue: diez muestras para densidad, masa volumétrica y resistencia a compresión; cinco muestras para resistencia a tracción y la velocidad de las ondas longitudinales; luego se determinó el índice de exactitud aplicando la distribución t de Student para probabilidad. En todos los casos la determinación dio un índice de exactitud menor de 3 %, por lo que se

consideró que el número de muestras ensayadas fue suficiente para obtener valores confiables.

La sección transversal de las muestras en varillas (V_L^v) se tomó de 4x4 mm, con longitud entre 80-120 mm; mientras que la sección transversal de las muestras en macizo (V_L^m) se tomó de 50x50 mm y una longitud de no menos de 10 cm.

2.2. Agrietamiento del macizo de rocas

Para el estudio de la estructura del macizo de rocas en el campo, además de las determinaciones del autor (sector este), se utilizó la información aportada por otros investigadores (Neves y Guardado 2012), realizada en los sectores sur y norte de la mina. El estudio de agrietamiento permite establecer las características de la fracturación estructural de las rocas, que son necesarias posteriormente en la investigación del mecanismo de fragmentación de las rocas por voladura. Ellas son: orientación de las grietas en el espacio (ángulo de buzamiento y azimuth del buzamiento); intensidad del agrietamiento: incluye abertura y distancia entre las grietas en los sistemas (fractura del macizo) y extensión de las grietas (su persistencia); indicadores de calidad del agrietamiento: material de relleno, carácter de la superficie de las grietas (ondulada o recta, rugosa o lisa), presencia de agua (seca, húmeda, inundada en forma de goteo o en chorro) (Kalichenko *et al.* 2000).

Como se dijo anteriormente, las características estructurales del macizo de rocas es el principal obstáculo para una óptima voladura. Independientemente de sus características y condiciones ellas pueden variar de una mina a otra y de área en área, dentro de una misma mina, por ello en este trabajo se dividió la mina en tres sectores de estudios estructurales: sur, norte y este; sin embargo, no se investiga el sector este ya que en el mismo no yacen los gneises objeto de la investigación.

Conforme a lo acordado y establecido en geología estructural de citar las direcciones geográficas con referencia a los 360° de la rosa de los vientos, estando situado el 0° en el norte y haciendo la graduación en la dirección de las agujas del reloj, y con el fin de facilitar la investigación, la interpretación de los datos de campo para el estudio del agrietamiento se realizó a partir de las etapas propuestas por otros investigadores (Kazikaev 1981; Hoek 2014).

De este modo, la técnica de la proyección estereográfica brindó la información de las distintas familias de grietas que intervienen en el macizo.

Finalmente, se realizó la interpretación de la salida gráfica dada por las rosetas.

La elaboración de las mediciones y su análisis, que incluye el tratamiento y representación, se realizó mediante el programa informático profesional DIP versión V 5.1, que consiste en procesar los datos medidos en el campo y obtener el comportamiento de las grietas en el macizo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades físico-mecánicas

Los resultados se muestran en la Tabla 2. Los gneises aparecen muy alterados y deteriorados generalmente en los niveles superiores, lo que requiere un análisis físico-mecánico particularizado para los diferentes niveles, dada su variabilidad en el perfil minero. Según Neves y Guardado (2012) los valores de resistencia al corte presentan diferencias, en dependencia de las cotas o niveles de la mina, y de acuerdo al grado de meteorización y agrietamiento.

Tabla 2. Resultados de las propiedades físico-mecánicas de las rocas

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Densidad de las rocas (ρ_0), (kg/m ³)	2 649
Masa volumétrica (ρ), (kg/m ³)	2 582
Resistencia a compresión simple estática [σ_c^e], (MPa)	60,06
Resistencia a tracción estática [σ_t^e], (MPa)	5,58
Velocidad de ondas longitudinales en la varilla (V_L^v), (m/s)	5 434,4
Velocidad de ondas longitudinales del macizo (V_L^m), (m/s)	5 029,4

3.2. Agrietamiento

Las rocas encajantes, los llamados gneises, sobreyacen los sedimentos arenoso-arcillosos y presentan un alto grado de alteración y agrietamiento. Las superficies de rotura pueden incluir no solo mecanismos de cizallamiento a lo largo de un plano preexistente, sino también estar combinadas con varias discontinuidades de grietas separadas, formando puentes rocosos. Estas superficies se manifiestan a través de tres familias de grietas (Figuras 1, 2 y 3) que se caracterizan por ser lisas, planas, de fricción y onduladas, y en ellas desarrollan mecanismos de cizallamiento a lo largo de las discontinuidades.

La información de las distintas familias de grietas que intervienen en el macizo aportada por la proyección estereográfica se ofrece en las

Tablas 3, 4 y 5. De esta valoración se señala que existe un alto grado de afectación del macizo por agrietamiento, y la existencia de grietas en todas las direcciones. En las grietas es más abundante el relleno de gneises meteorizado. La presencia de agua en las grietas, por lo general, es mucha, prácticamente en todas las estaciones del año, y se agudiza aún más en la época de lluvias. Prevalecen grietas sanas y no alteradas a medida que se profundiza en la mina. La caracterización general del agrietamiento en los tres sectores investigados se puede resumir en lo siguiente:

3.2.1. Sector sur

Familia de grietas 1: Azimut del buzamiento 160° – 200° . El ángulo de buzamiento varía desde 0° hasta 50° . Se observa una extensión de 0–15 m, la distancia entre las grietas es de 0,2–1,0 m. Las direcciones predominantes según el rumbo de las grietas $N75^{\circ}$ E.

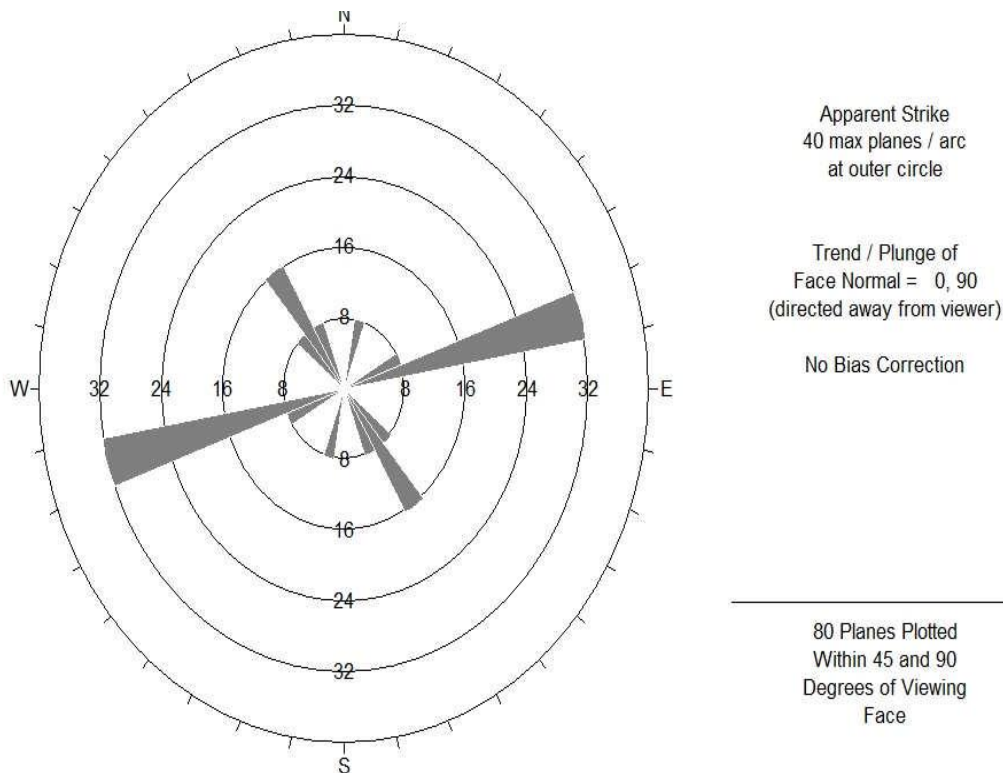


Figura 1. Diagrama de rosetas del agrietamiento del sector sur de la mina.

Tabla 3. Elementos de yacencia estructurales del sector sur de la mina

Cotas	Familia	Azimut/Buz. (Grado)		Abertura (cm)	Espac. (m)	Suprf.	Relleno
960	I	80	100	0,5	2	lisa	gneis
	II	88	192	0,7	2,5	lisa	gneis
	III	23	248	0,3	5	lisa	gneis
950	I	29	296	0,5	5	rugosa	gneis meteorizado
	II	70	240	0,5	5	lisa	gneis y agua
	III	85	245	0,3	3	lisa	gneis y agua
940	I	54	190	0,5-0,7	5	rugosa	gneis y agua
	II	55	185	0,3-0,5	5	ondulada	gneis y agua
	III	65	75	0,6	2-3	ondulada	gneis y agua
930	I	90	320	0,9	2-3	rugosa	gneis y agua
	II	58	176	1,0	3	lisa	gneis meteorizado
	III	69	350	1,0	3,5	lisa	gneis meteorizado

3.2.2. Sector norte

La distancia entre las grietas es de 0,3–0,7 m (media=0,5 m) y la magnitud de la extensión de 1–2 m.

Familia de grietas 2: Azimut del buzamiento 230°–260°. Ángulo del buzamiento 78°–84°; en el afloramiento No. 10 el buzamiento en el este alcanza direcciones (azimut del buzamiento 93°, ángulo del buzamiento 65°). La extensión observada es de 2–3 m; la distancia entre las grietas es de 0,5 a 1,5 m.

Familia de grietas 3: Azimut del buzamiento varía 182°–190°. El ángulo de buzamiento desde 40°–45° hasta 65°.

En la Figura 2 se muestran las direcciones predominantes según el rumbo de las grietas N10–20° W y N55° E y EW.

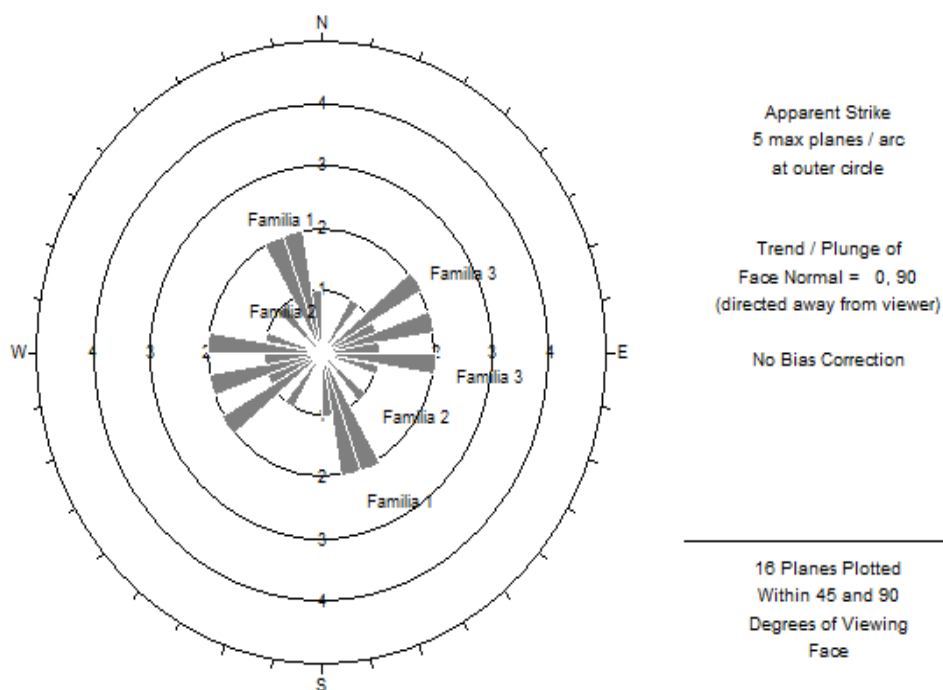


Figura 2. Diagrama de rosetas del agrietamiento del sector norte de la mina.

Tabla 4. Elementos de yacencia estructurales del sector norte de la mina

Cotas	Familia	Azimut/Buz. (Grado)	Abertura (cm)	Espac. (m)	Suprf.	Relleno
930	I	74	331	0,3	2	lisa gneis meteorizado
	II	83	83	0,3-0,5	2	lisa gneis
	IIIa	44	44	0,5-0,7	2	lisa gneis
930	I	183	58	0,2-0,3	1	rugosa Gneis meteorizado
	II	358	84	0,5-0,7	2	lisa gneis y agua
	IIIa	243	41	0,1-0,2	0,5	lisa gneis
930	I	54	3	0,7-1,0	1	lisa gneis meteorizado
	II	79	256	1,0-1,5	3	rugosa gneis
	IIIa	45	45	-	-	lisa gneis meteorizado
920	I	59	349	0,5	1,5	ondulada gneis meteorizado
	II	82	73	0,1	1,5	lisa gneis y agua

	IIIb	16	124	0,3-0,5	5-7	lisa	gneis meteorizado
920	I	58	322	0,3-1,0	5	lisa	gneis meteorizado
	II	80	81	0,5-3,0	5	lisa	gneis meteorizado
	IIIa	29	176	1,0-1,5	5	lisa	gneis y agua
920	I	70	349	0,3-0,5	15	lisa	gneis meteorizado
	IIIa	34	152	-	-	lisa	gneis meteorizado
	I	75	304	0,3-0,5	2	lisa	gneis meteorizado
920	II	72	64	1,0-1,5	2-3	lisa	gneis y agua
	IIIa	54	196	1,0-2,0	2-3	lisa	gneis meteorizado

3.2.3. Sector este

Se observa un espaciamiento entre grietas y sistemas de grietas, oscilando entre 0,85-1,00 m valores mínimos y máximos, respectivamente. En las superficies de las grietas son más representativas las grietas lisas con aberturas rellenas con gneis meteorizado de hasta 1,00 cm.

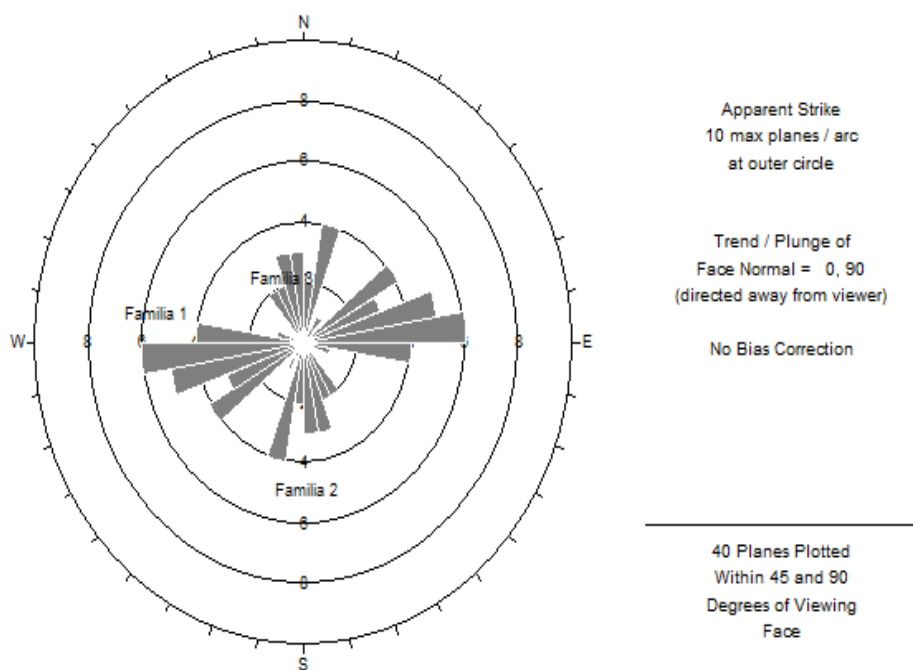


Figura 3. Diagrama de rosetas del agrietamiento del sector este de la mina.

Tabla 5. Elementos de yacencia estructurales del sector este de la mina

Cotas	Familia	Azimut/Buz. (Grado)		Abertura (cm)	Espac. (m)	Suprf.	Relleno
940	I	44	331	0,3	2	lisa	gneis
	II	68	330	0,4	2	lisa	gneis
	III	83	245	0,65	2	lisa	gneis
940	I	56	50	0,5	1	lisa	gneis
	II	56	85	0,7	2	ondulada	gneis
	III	29	227	0,5	0,5	ondulada	gneis
940	I	44	180	1,5	1,5	lisa	gneis meteorizado
	II	55	89	1,5	1	lisa	gneis meteorizado
	III	45	185	1,5	3	rugosa	gneis meteorizado
930	I	80	250	0	0	lisa	gneis meteorizado
	II	60	75	0,5	1,5	lisa	gneis meteorizado
	III	85	350	1	1	ondulada	gneis meteorizado
920	I	20	122	0,5	6	lisa	gneis meteorizado
	II	75	330	0	0	lisa	gneis meteorizado
	III	55	330	0,5	3,5	lisa	gneis meteorizado

4. CONCLUSIONES

- Las propiedades máxicas de las rocas clasifican como rocas compactas, densas, poco porosas, que muestran valores de resistencia medios.
- Desde el punto de vista estructural el yacimiento en los tres sectores concebidos para el estudio presenta tres familias de grietas principales, lo que conduce a la formación de bloque naturales de disimiles tamaños, razón por la cual durante los trabajos de voladuras se obtienen pedazos de dimensiones no admisibles por la técnica empleada en los eslabones del proceso tecnológico minero

5. REFERENCIAS

- DIÉGUEZ, Y. Campo tenso-deformacional para voladuras con cordón detonante en el laboreo de túneles. *Minería y Geología*, 29(3): 38-55, 2013.
- DIÉGUEZ, Y.; Otaño, J. y Sargentón, G. Diseño de voladuras de contorno. *Minería y Geología*, 30(3): 49-66, 2014.
- HOEK, E. *Practical Rock Engineering*. New edition complete, 24 MB. 2014. Consulta: 20 julio 2014. Disponible en: www.rocscience.com.
- KAZIKAEV, D. M. *Procesos geomecánicos en la explotación conjunta y ulterior de las menas*. Moscú: Nedra, 1981. 89 p.
- KALICHENKO, V. M.; STIEPIN, N. I.; TUPIKLIN, I. I. Y USHAKOV, I. N. *Geometría del subsuelo*. Novcherkask: YRGU, 2000. 78 p.
- LANGFORS, U. Y KIHLMSTROM, B. *Técnica Moderna de Voladura de Rocas*. Bilbao: Ediciones Urmo, 1963.
- NEVES, D. Y GUARDADO, R. Deslizamientos de taludes en el yacimiento kimberlítico de Catoca (Angola). *Minería y Geología*, 27(3): 26-42, 2011.
- NEVES, D. Y GUARDADO, R. Evaluación de las propiedades geotécnicas de las rocas y suelos en el complejo minero kimberlítico de Catoca (Angola). *Minería y Geología*, 28(3): 1-17, 2012.
- OTAÑO, J. *Fragmentación de rocas con explosivos*. La Habana: Félix Varela, 1998.
- PEDRO, A.; JOE, S. Y OTAÑO, J. Análisis del diseño de voladuras con cargas compactas en la cantera de áridos El Cacao. *Minería y Geología*, 22(4), 2006.
- SUJANOV, A. F. Y KUTUZOV, B. N. *Fragmentación de rocas*. Moscú: Nedra, 1967.

Recibido: 14/07/16

Aprobado: 05/09/17

Nunes Filipe, Ingeniero de minas. Escuela Superior Politécnica de Lunda-Sur, Angola, nfilipe@outlook.pt