

Evaluación de las propiedades geotécnicas de las rocas y suelos en el complejo minero kimberlítico de Catoca (Angola)

Domingos M. Dos Santos Neves-Margarida
Rafael Guardado-Lacaba

Resumen

En el complejo minero de Catoca (Angola) son muy frecuentes los deslizamientos de suelo y rocas, por lo que se realizó la caracterización físico-mecánica y geotécnica del macizo y su matriz rocosa. Se tomaron como base los sistemas de clasificación de deslizamientos propuestos por Hutchinson y Varnes. El factor de seguridad se estableció según el coeficiente de debilidad estructural (λ), el cual resultó de 0,70 en las rocas superficiales, las areniscas y arenas intraformacionales; 0,50 en los gneis eluviales sobresaturados; 0,58 en los gneis agrietados y 0,47 en el cuerpo mineral compuesto del pórfido kimberlítico meteorizado y húmedo y la kimberlita porfírica meteorizada. Estos valores reflejan la baja resistencia del macizo e indican la conveniencia de una nueva reformulación del laboreo en la mina y la construcción de taludes más estables. Se pudo constatar asimismo que la deformación de las rocas en los taludes y cortes de la mina Catoca está condicionada por el movimiento de las aguas subterráneas dentro del macizo rocoso.

Palabras clave

Geotecnia; yacimientos kimberlíticos; deslizamientos; estabilidad de taludes.

Geotechnical evaluation of rocks and soils in Catoca kimberlitic mining complex (Angola)

Abstract

Landslides and rock sliding occur very frequently in the mining area of Catoca, located in Angola. Therefore, a physical/mechanical and geotechnical characterization of the massif and the rock matrix was carried out adopting the landslide classifications as proposed by Hutchinson and Varnes. The safety factor was applied based on the structural weakness coefficient (λ); resulting in 0.70 in surface rocks, sandstones and intraformational sands; 0.58 in oversaturated eluvial gneiss; 0.50 in cracked gneiss and 0.47 in the ore compound of weathered, moist kimberlitic porphyric and weathered porphyric kimberlite. These results indicate the low strength of the massif and the need to reformulate the activities in the mine and the construction of more stable slopes. It could also be observed that deformation of rocks in the slopes and the cuts in the Catoca mine is conditioned by the movement of underground water within the rock massif itself.

Keywords

Geotechnics; kimberlite ore bodies; landslides; slope stability.

1. INTRODUCCIÓN

En el complejo minero kimberlítico de Catoca (Angola), desde su apertura en el 2002, han ocurrido deslizamientos de rocas y suelos en los taludes de la mina. El yacimiento Catoca (YC) es minado a cielo abierto, con un talud alto de más de 600 m, según proyecto. Este tipo de yacimiento diamantífero requiere de una geometría de minado que está en función del cuerpo mineral y del conjunto de condiciones ingeniero-geológicas del medio, en particular de sus propiedades geotécnicas (Figura 1).

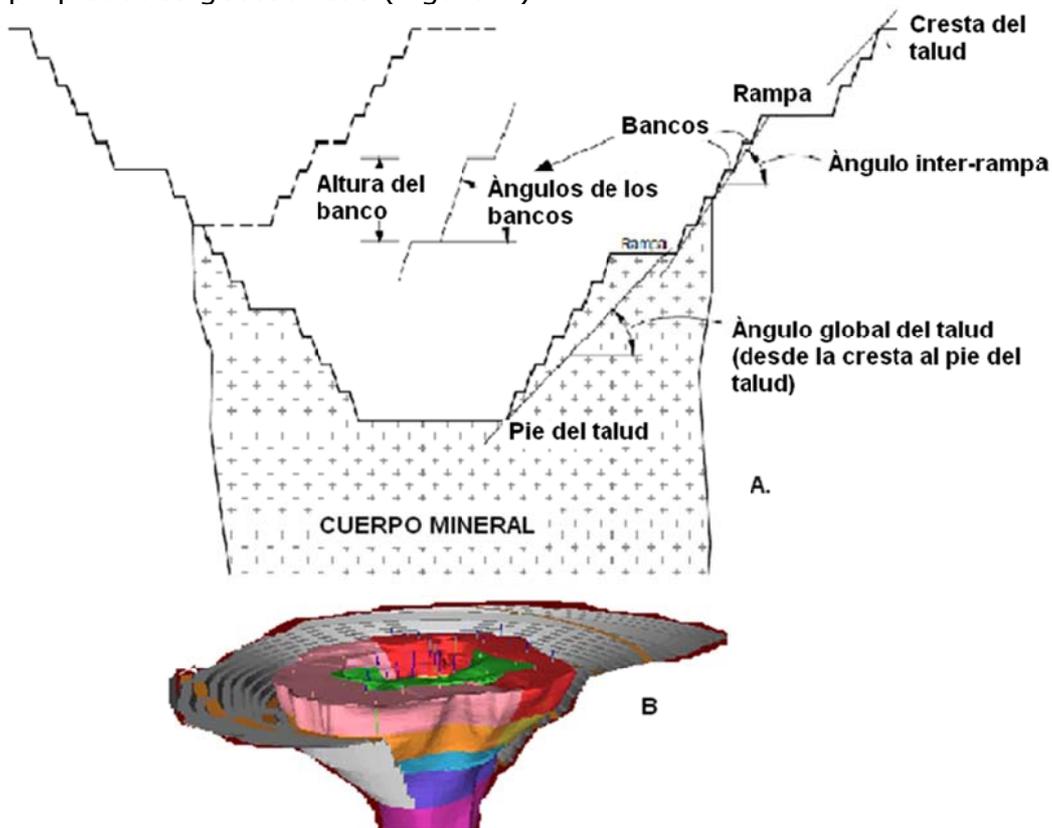


Figura 1. A. Configuración de una mina a cielo abierto con taludes altos.
B. Esquema 3D de la mina de Catoca.

Entre los múltiples aspectos que contempla el proyecto de diseño y minado del YC se encuentran el método de explotación, el dimensionamiento geométrico y la determinación del ritmo anual de producción y de los procesos y fenómenos geodinámicos que afectan el minado. La variabilidad de los parámetros y la dificultad de cuantificación total de estos han impedido el perfeccionamiento de reglas y esquemas precisos de minado.

La evaluación y mitigación de deslizamientos ha sido ampliamente tratada en las áreas urbanas sujetas a estos movimientos (Voight 1989; Schuster 1996; Petley *et al.* 2005) y las propiedades físico-mecánicas e ingeniero-geológicas de las rocas han sido estudiadas y reportadas por Dick *et al.* (1992) y Chen (2002); sin embargo, no abundan los estudios de estabilidad para el caso de minas a cielo abierto con taludes altos.

El objetivo de este artículo es evaluar las propiedades físico-mecánicas de las rocas y suelos en el YC para evaluar integralmente la estabilidad en el macizo y evitar la ocurrencia de deslizamientos en el complejo minero.

2. METODOLOGÍA

La evaluación de la estabilidad de los taludes en la mina Catoca tuvo como punto de partida el estudio de las condiciones ingeniero-geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, así como de las propiedades físico-mecánicas, en particular, la resistencia de las rocas y los parámetros de cálculo de los bancos de la mina.

Para este estudio se empleó la nomenclatura tratada comúnmente en la geotecnia iberoamericana, utilizando como base los sistemas de clasificación de deslizamientos (Hutchinson 1968, 1988; IAEG 1976; Varnes 1985; Ayala 1987; Augusto Filho *et al.* 1990; Cerri 1993; Zuquette 1993 y Prandini *et al.* 1995).

El procedimiento metodológico para la evaluación de las propiedades geotécnicas siguió dos etapas: 1) Levantamiento de la información y 2) Análisis y procesamiento de la información.

2.1. Levantamiento de la información

Se registró la ubicación espacial de los sondeos, calicatas y trincheras. Los sondeos permitieron determinar el tipo, disposición y espesor de las unidades geotécnicas presentes en la mina, así como las condiciones de resistencia *in situ* y de la humedad natural. Para el estudio de las propiedades físico-mecánicas se realizaron 48 sondeos, se construyeron 39 calicatas, 24 trincheras y se tomaron muestras en los afloramientos de los taludes. El análisis geotécnico de la estabilidad de los taludes se realizó a partir de la comparación de las propiedades físico-mecánicas de las rocas del YC con las condiciones ingeniero-geológicas regionales.

2.2. Análisis y procesamiento

La información obtenida durante la etapa inicial se procesó cualitativa y cuantitativamente. Para conocer integralmente el comportamiento de la estabilidad en los taludes de la mina se determinaron, mediante ensayos de laboratorio, las propiedades físicas y mecánicas de las rocas. Además, se realizaron análisis geoestadísticos sobre la base de lo que reportan Eberhardt *et al.* (2004) y Gruber & Hoelzle (2001) para la modelación estadística de macizos rocosos.

Se calculó el factor de seguridad, según metodología de Fisenko (1972), quien creó el concepto de *coeficiente de debilidad estructural* (λ), que responde a una igualdad entre la magnitud de la resistencia de la muestra y la del macizo rocoso. Este coeficiente se determinó de forma experimental para las rocas sobreyacentes, los gneis meteorizados y agrietados y las rocas kimberlíticas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades físico-mecánicas de las rocas

3.1.1. Rocas sobreyacentes

Como se aprecia en el perfil de la Figura 2, los gneis y el cuerpo kimberlítico de Catoca aparecen cubiertos por rocas friables, representadas por arenas finas muy finas y sedimentos arenoso-arcillosos. En el sector oeste de la mina la potencia de estos sedimentos es de hasta 5 m; en el sector norte y sur se incrementa en un rango de 35-45 m; hacia el este alcanza valores mayores, de hasta 50-55 m y conforma dos estratos con una potencia promedio de 20 m. El estrato superior está compuesto por areniscas de la formación Calahári; el inferior lo componen arenas intraformacionales, las que por lo general presentan intercalados lentes de un conglomerado fino de unos dos metros de espesor. Las arenas son sedimentos muy débiles y muy permeables que no ofrecen seguridad a los taludes y bermas de la mina.

Las propiedades físico mecánicas de los sedimentos se detalla en los trabajos ingeniero-geológicos, según la Tabla 1. Estos suelos poseen una cohesión significativa debido a la presencia de arcillas.



Figura 2. Distribución de los sedimentos sobreyacentes, los gneis según su meteorización y agrietamiento. Obsérvese el alto grado de erosión en cárcavas en estos sedimentos.

Tabla 1. Resultados de los indicadores geotécnicos de los sedimentos sobreyacentes del kimberlito de Catoca

Tipo de Roca	Humedad, ω %	Densidad γ , kN/m^3	Cohesión, C kN/m^2	Ángulo de fricción interna, ϕ ($^\circ$)
Arenas de Calahári	8,12-10,23	19,0-22,1	4,13 - 1850	28,3-46,16
Arena interformacional	9,24 - 15,30	19,2- 21,8	5,0-13,7	21,22-36,13

En los sedimentos superiores se observan zonas con una potente erosión en cárcavas, las que tienen diferentes tamaños debido a la acción erosiva de las aguas superficiales y subterráneas. Las mayores cárcavas aparecen en el sector NE (Figura 3). En algunos casos el agua drena desde los horizontes superiores (cota + 990 m) hasta los horizontes inferiores (cota +980 m), generando una erosión subterránea profunda y amplia en los taludes conformados por estos sedimentos. A este proceso se le denomina sifonamiento, y se desarrolla notablemente en el sector norte, este y sur.



Figura 3. Efectos de la erosión en cárcavas y del sifonamiento en los sedimentos de cobertura arenisco-arcillosos, obsérvese cómo el talud es deformado por la acción del agua subterránea.

El desarrollo mecánico del sifonamiento está determinado por la composición granulométrica de estas rocas. Los suelos son arenas muy finas con elevados gradientes hidráulicos que provocan una alta erosión subterránea durante las precipitaciones intensas.

3.1.2. Rocas encajantes (gneis)

Como se puede observar en la Figura 4A los gneis muestran un sistema complejo de grietas de tres familias. Las superficies de ruptura pueden incluir no solo mecanismos de cizallamiento a lo largo de un plano preexistente, sino que pueden, además, estar combinados con varias discontinuidades de grietas separadas, formando puentes rocosos que al unirse conforman la superficie de fallo.

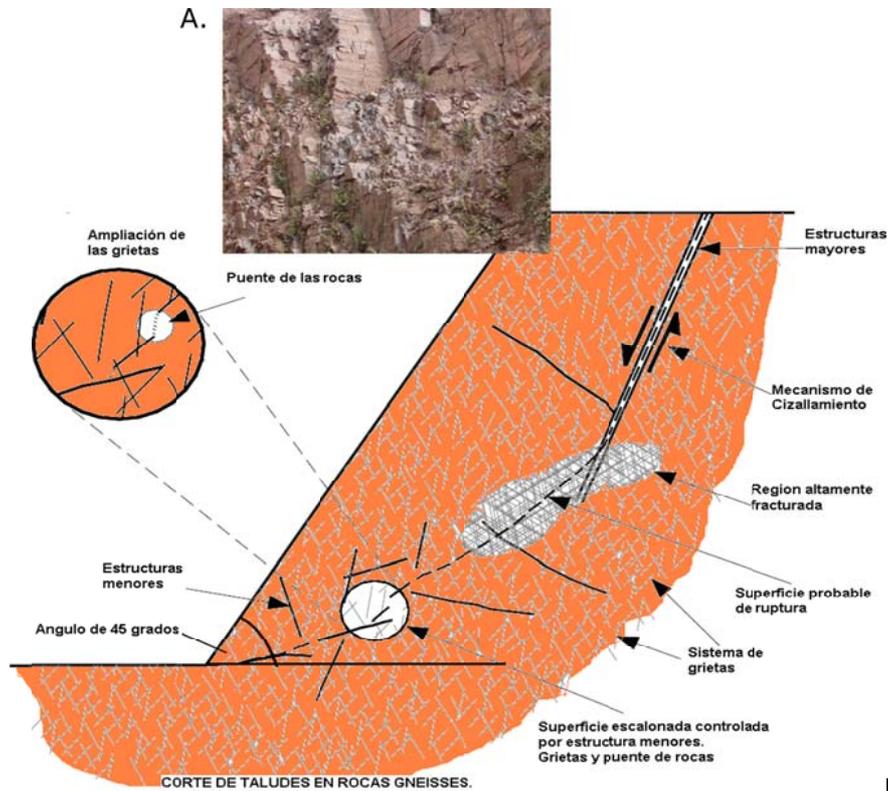


Figura 4A. Gneis encajantes con diferentes grados de meteorización y agrietamiento NE 4/44°. B. Esquema de los corte de los taludes en las rocas gneis en la mina de Catoca; se ilustra los elementos de grietas existente en el macizo rocoso.

Los gneis aparecen muy alterados y deteriorados. El análisis físico-mecánico de los mismos requiere de una correcta atención debido a sus variaciones en el perfil minero. Los valores de la resistencia al corte (ángulo de fricción interna ϕ y cohesión C) presentan diferencias según las cotas o niveles de la mina en dependencia del grado de meteorización y agrietamiento. Los bajos resultados del ángulo de fricción indican la presencia de material arcilloso. Altos valores de este indicador se corresponden con las areniscas y los materiales limosos de granulometría variada, con bajo contenido de material arcilloso.

En las Figuras 5 y 6 se observa que la heterogeneidad del material provoca un cambio significativo en el ángulo de fricción interna y en la cohesión.

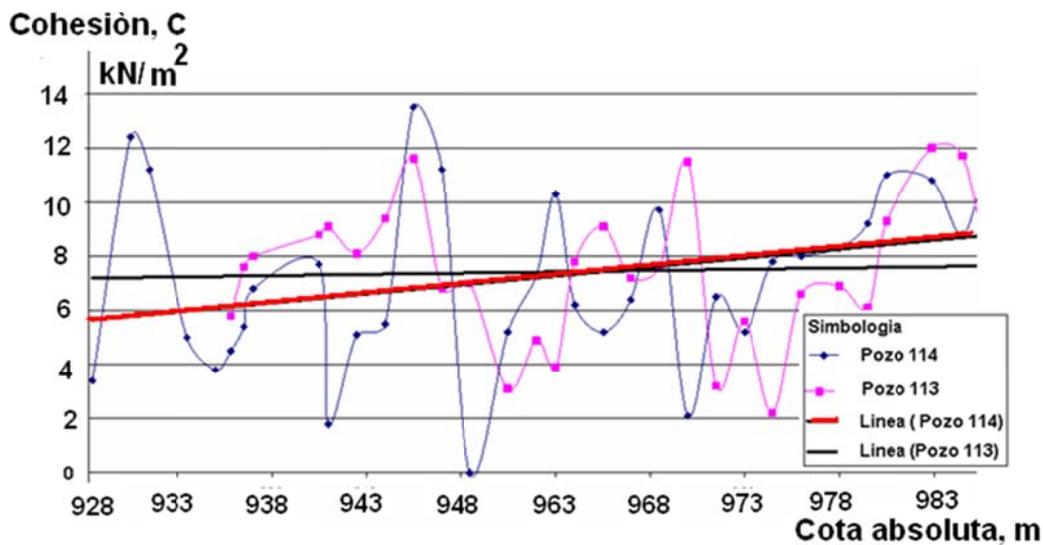


Figura 5. Gráfico de correlación entre la cohesión C de lo gneis y las cotas absolutas de los pozos paramétricos 113 y 114.

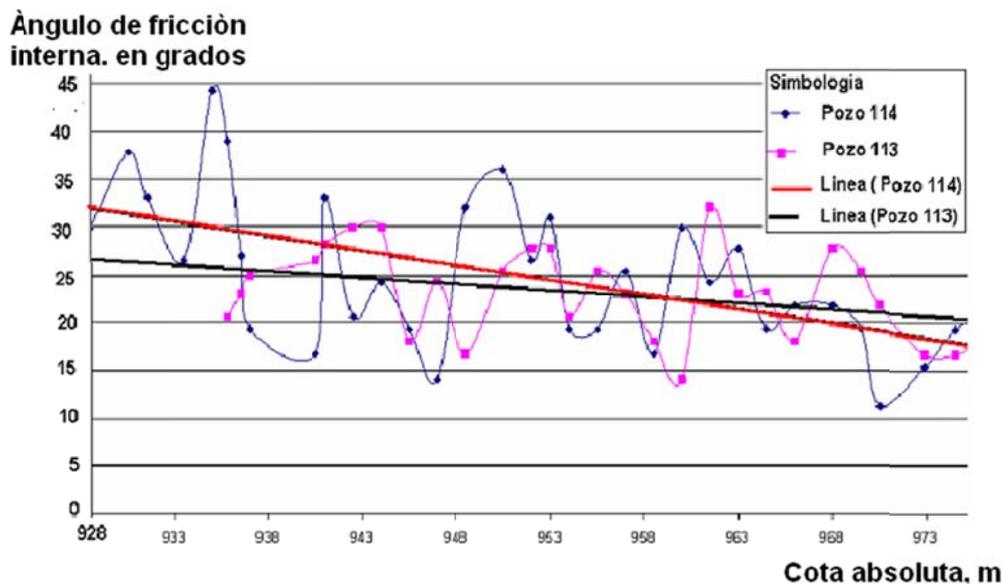


Figura 6. Gráfico de correlación entre el ángulo de fricción interna ϕ de los gneises y la cota absoluta según los pozos paramétricos 113 y 114.

En la Figura 7 se muestra la dependencia de los ángulos de fricción interna y la cohesión en los gneis intemperizados y las cotas absolutas según los distintos pozos, calicatas y muestreo ingeniero-geológico de los cortes. Es significativo que el fallo es desconocido y en ocasiones no se entiende. La línea de la cohesión indica valores

prácticamente constantes ($6,0 - 10,0 \text{ kN/m}^2$) y el ángulo de fricción interna con la profundidad desde 17 hasta 30 grados. Así pueden dividirse estos gneis en dos tipos: eluvios menos resistentes y eluvios más resistentes. En la Figura 8 se representan los valores en MPa, observándose claramente los cambios de estos valores según el tipo de roca.

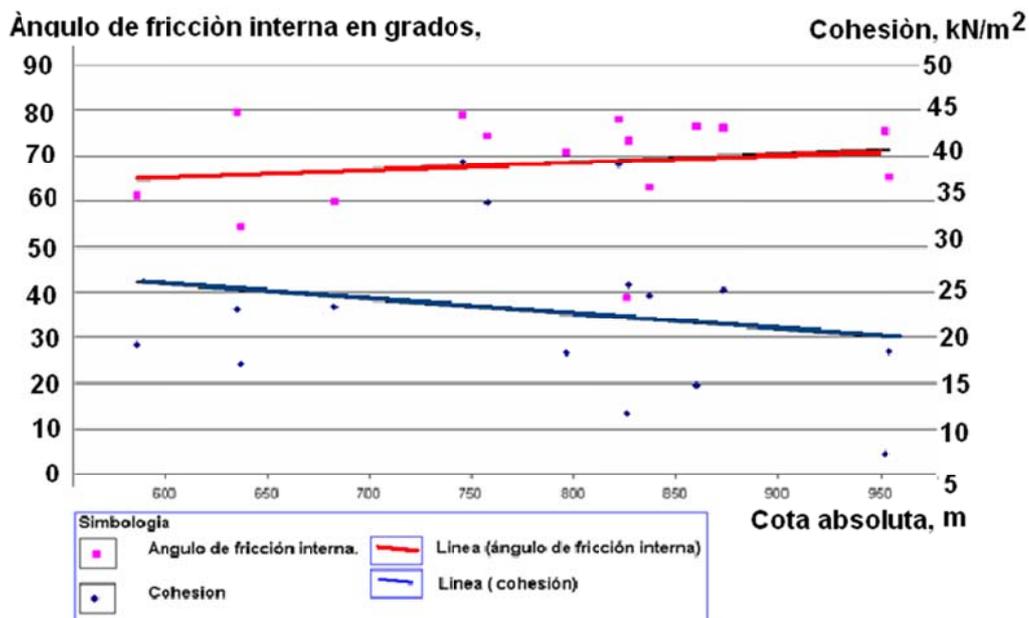


Figura 7. Gráfico de interrelación entre el ángulo de fricción interna ϕ y la cohesión C para los gneis de la corteza de meteorización según las cotas absolutas de los pozos 106, 111, 113, 114, 123.

En la Figura 8 se presenta un gráfico que correlaciona la cohesión y el ángulo de fricción interna con las cotas absolutas, según la generalización de los datos, los ángulos de fricción varían desde 32° hasta 36° y la cohesión desde 15 kN/m^2 hasta 22 kN/m^2 . Las figuras antes expuestas sirven de orientación para evaluar la resistencia de los gneis en los intervalos de profundidad. De esta manera, la resistencia se puede clasificar, según el grado de meteorización, en cinco tipos: 1. Gneis eluvial, 2. Gneis alterado-fragmentado, 3. Gneis poco resistente-meteorizado, 4. Gneis relativamente meteorizado-resistente, y 5. Gneis muy resistente (Tabla 3).

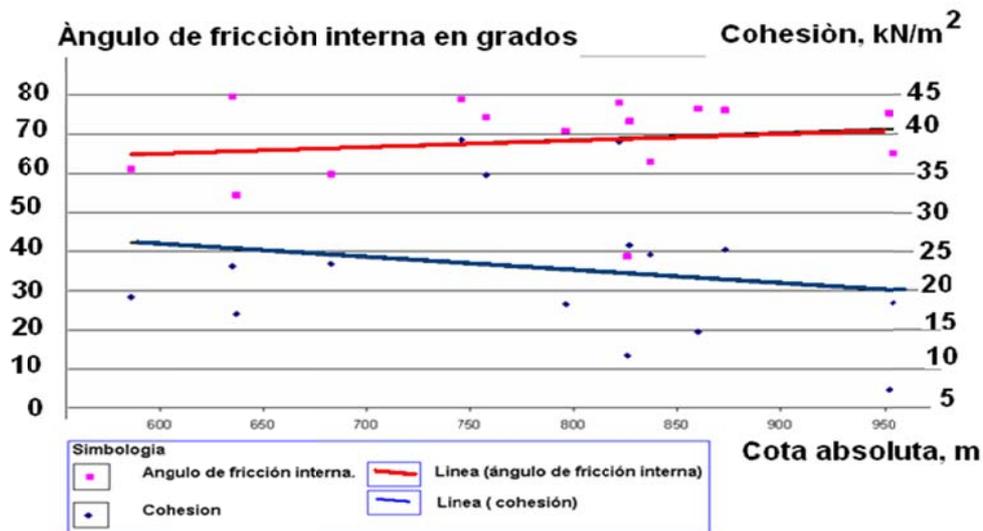


Figura 8. Relación de dependencia entre la cohesión C y la fricción interna ϕ de los gneis.

Los datos de campo y laboratorio permiten afirmar que en los primeros metros los gneis alterados yacen alrededor de la cota +970 m, y la potencia más fuertemente meteorizada alcanza no más de 10 m (eluvios y cuerpo mineral) (azimut $0-180^\circ$). Debajo de la cota 950 m yacen los gneis relativamente alterados y resistentes (Figura 9).

La baja resistencia de las rocas al corte y las deformaciones en ellas reflejadas demuestran la necesidad de medidas que garanticen la estabilidad de los taludes. El ángulo ϕ y la cohesión calculados permiten una mejor clasificación de los diferentes tipos de rocas en la mina.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de la resistencia al corte de los gneis

Tipo de rocas	Humedad (%)	Peso Volumétrico (kN/m^3)	Cohesión (kN/m^2)	Ángulo de fricción interna, ϕ°
Gneis eluvial	25,2 – 32,9	19,0 – 23,0	6,3 – 9,8	20,30 – 24,57
Gneis alterados	11,6 – 30,1	22,2 – 23,3	7,5 – 23,9	19,7-39,42
Gneis poco resistentes	10,5 – 20,4	23,3 – 27,0	11,8 – 27,3	23,81-39,4
Gneis relativamente meteorizados	11,4 – 28,0	24,2 – 28,1	46,3 – 72,2	26,62-38,9
Gneis resistentes	9.4 – 18.3	25,1 – 27,3	97.5 – 250.3	27.2-39.7
Valores Promedios	18.3	26,0	197.0	33.94

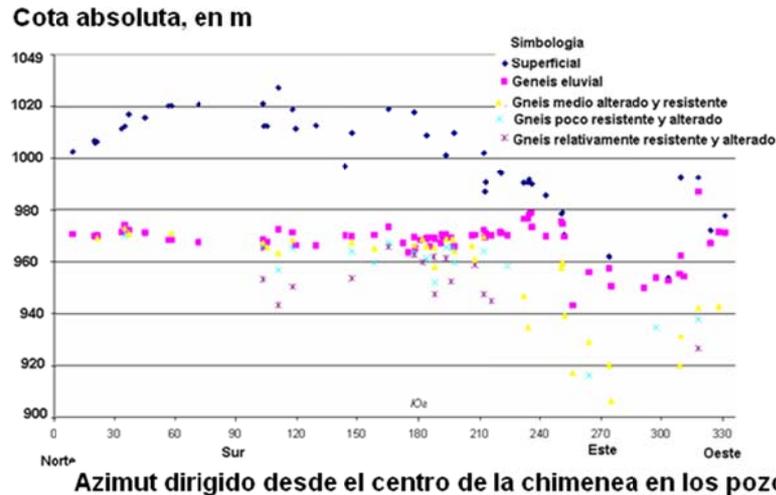


Figura 9. Gráfico de correlación entre las cotas de los gneis encajantes y su azimut.

Las Figuras 10 y 11 indican que con la profundidad el ángulo de fricción interna ϕ prácticamente no cambia. Para las rocas vulcanógenas sedimentarias (RVS) la resistencia al corte se caracteriza por su poca dependencia con la profundidad, por esto se debe tomar un valor promedio. Las características de la BKA se estabilizan para una profundidad más o menos de 400 m. Las características de resistencia al corte de estas rocas se representan en la Tabla 4.

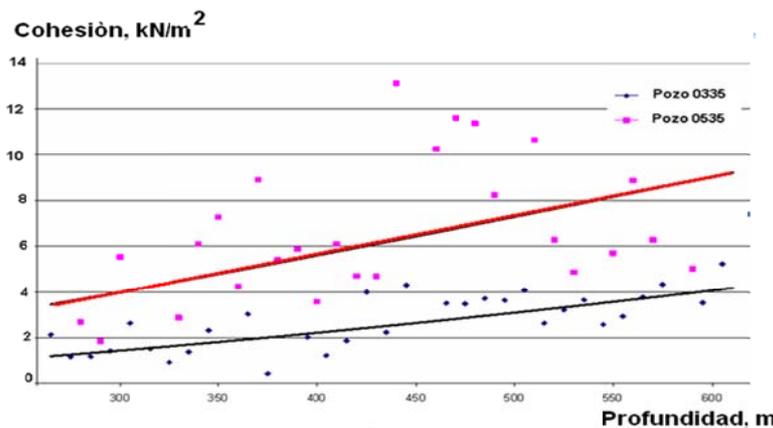


Figura 10. Gráfico de correlación entre la cohesión y la profundidad de las brechas kimberlíticas autolíticas BKA (pozos 0335 y 0535).

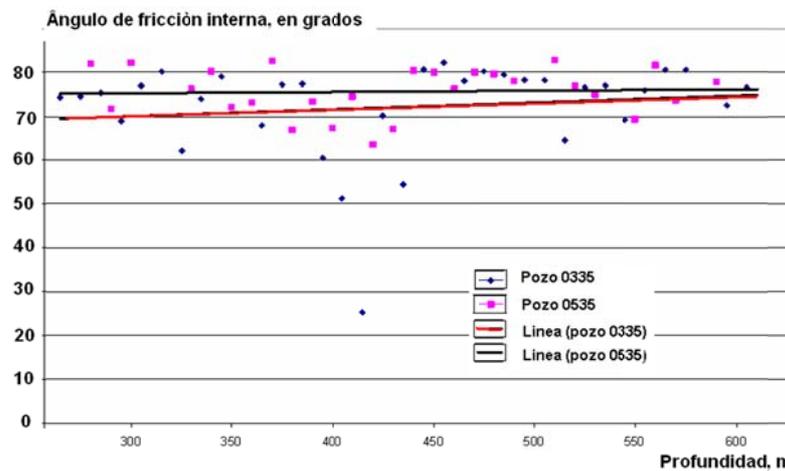


Figura 11. Gráfico de correlación entre el ángulo de fricción interna ϕ de las BKA según la profundidad de los pozos 0335 y 0535.

Tabla 4. Propiedades físico-mecánicas del cuerpo mineralizado

Tipos de rocas	Humedad ω , %	Peso Volumétrico γ , (KN/m ³)	Cohesión, C, (KN/m ²)	Ángulo de fricción interna, ϕ °
Rocas areniscas intraformacionales	23,4 – 32,4	15,4 – 19,6	6,4- 22,8	16,83–26,05
Brechas kimberlíticas meteorizadas (BKM)	34,6 – 34,8	21,8 – 23,4	6,0 – 12,8	16,9-24,3
Brechas kimberlíticas Pirofóricas meteorizadas y de gran humedad (BKP)	44,5 – 58,3	19,3 – 25,0	6,5 – 8,5	4,60-5,61
Brechas kimberlíticas Tobaceas (BKT)	24,4 – 38,0	20,9 – 24,1	6,9 – 8,0	6,62-8,66
Valores promedios	27,4	17,1	6,9	8,67

3.2. Coeficiente de debilidad estructural

Los deslizamientos producidos en la mina de Catoca guardan gran relación con la humedad de las rocas. Los gneis que aparecen en los sectores E y NE están muy húmedos y albergan manantiales fuertes que contribuyen al movimiento de las rocas en la mina.

Una vez conocido el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y de sus propiedades físico-mecánicas, calculamos la estabilidad de los taludes tomando en consideración los siguientes valores de cálculo de la resistencia y peso volumétrico de la matriz rocosa.

- Masa deslizada rocas arenosos con humedad natural $\phi=23,44^\circ$, $C=2,10 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19,3 \text{ kN/m}^3$
- Masa deslizada roca arenosa sobresaturada - $\phi=13,15^\circ$, $C=25 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19,1 \text{ kN/m}^3$;
- Masa deslizada gneis con humedad $\phi=18,45$, $C=4,5 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=19,5 \text{ kN/m}^3$;
- Gneis eluvial valle del rio Loba $\phi=7,77$, $C=7,5 \text{ kN/m}^2$, $\gamma=1,93 \text{ kN/m}^3$.

Una vez establecidas las propiedades físico-mecánicas de clasificación y cálculo se determinó el coeficiente λ para las rocas sobreyacentes, los gneis meteorizados y agrietados, y las rocas kimberlíticas.

$$\lambda = \frac{1}{1 + a \ln (H/h)},$$

Donde:

λ - Coeficiente de debilidad estructural

H/h - relaciona la altura relativa del talud con el tamaño de las bermas para un bloque elemental de $H/h > 15$; se toma entonces $H/h=15$

a - Coeficiente, que dependerá de la resistencia de las rocas y del carácter del agrietamiento.

En la Tabla 5 se resumen las propiedades físico-mecánicas de las rocas y los valores promedios del coeficiente de debilidad estructural del macizo en el kimberlito Catoca.

Tabla5. Resumen de las propiedades físico mecánicas de las rocas y del coeficiente de debilidad estructural del macizo en el kimberlito Catoca

Descripción de los diferentes tipos de rocas	Humedad, ω , %	Peso Volumétrico, kN/m^3	Cohesión, kN/m^2	Ángulo de fricción interna, ϕ°	Coefficiente de debilidad estructural (λ)
Arena Calahári	11,1	20,8	10,9	26,02	0,70
Arena Calahári sobresaturadas.	13,5	21,5	2,9	23,44	0,70
Arenas interformacionales (AIF2)	12,7	20,1	10,1	24,91	0,70
Arenas interformacionales (AIF1) sobresaturadas	16,5	20,5	6,4	21,91	0,70
Gneis eluviales	26,7	20,9	7,2	21,92	0,58
Gneis eluviales sobresaturados	34,7	21,2	6,3	17,41	0,58
Gneis agrietados	19,6	21,0	13,0	31,82	0,58
Gneis de baja resistencia	-	24,4	16,04	33,67	0,110
Gneis relativamente resistente.	-	2,55	59,17	29,27	0,068
Gneis resistentes	-	26,0	197,0	33,94	0,036
Xenolitos zona de transición	12,3	20,8	14,2	35,28	0,110
Pórfido kimberlítico meteorizado y de gran humedad	51,1	17,9	69	5,05	0,47
Kimberlita porfírica meteorizada	34,5	16,4	11,3	16,6	0,47
BKM	12,0	20,9	193	35,04	0,110
BKA1	12,2	21,6	252	35,04	0,110
BKA2	7,5	23,2	452	36,27	0,110

Actualmente la cota del fondo de la mina está en el nivel + 850 m. La situación de la mina de Catoca es compleja a causa de las deformaciones que se presentan en sus taludes. Estas deformaciones se desarrollan en los sectores superiores del NE y E, donde el macizo

rocoso aparece muy alterado, agrietado, y abundante presencia de las aguas subterráneas.

4. CONCLUSIONES

La deformación de las rocas en los taludes y cortes de la mina Catoca está condicionada por el movimiento de las aguas subterráneas en las rocas del complejo minero. Las deformaciones por filtración de las rocas pueden ser subdivididas en sifonamiento mecánico, presión de poro e inestabilidad de las rocas en la zona del flujo de filtración en los taludes, canteras, y las filtraciones que se producen a través de las grietas.

El coeficiente de debilidad estructural de las rocas es variable en dependencia del tipo de roca y mantiene una proporción con la resistencia mecánica. Se observa que en las rocas superficiales las areniscas y arenas intraformacionales posee un valor bajo (0,70), en los gneis eluviales sobresaturados los valores son más bajos aún (0,50) y en los gneises agrietados (0,58). En el pórfido kimberlítico meteorizado, de gran humedad y la kimberlita porfírica meteorizada es donde el coeficiente alcanza los valores más bajos: 0,47.

Para las rocas vulcanógenas sedimentarias la resistencia al corte se caracteriza por su poca dependencia con la profundidad, por esto se debe tomar un valor promedio. Las características de la BKA se estabilizan para una profundidad más o menos de 400 m.

Estos valores reflejan la baja resistencia del macizo y su baja capacidad para los cortes en ellos practicado lo que implicó una nueva reformulación del laboreo mineral en la mina y la construcción de taludes más estables.

5. REFERENCIAS

- AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. 1990: Riscos Geológicos: Aspectos Conceituais. In: Simpósio Latino Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1. São Paulo. Anais...ABGE. 334-341.
- AYALA, F. J. 1987: Introducción a los riesgos geológicos. En: Riesgos Geológicos. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 3-19.
- CHEN, H. M. 2002: A study on failure mechanisms of weatheringsedimentary rock in southern of Taiwan and mitigation. n. M.SThesis. National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan.
- CRUDEN, D. M. 1991: A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 43, 27-29.

- DICK, J. C.; SHAKOOR, A. 1992: Lithological controls of mudrock durability. *Q. J. Eng. Geol.* 25, 31–46.
- EBERHARDT, E.; STEAD, D.; COGGAN, J. S. 2004: Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes – the 1991 Randa rockslide. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(1): 68–87.
- FISENKO, G. L. 1972: *Indicación metodológica para determinar el coeficiente de debilidad estructural de los taludes en las minas a cielo abierto*. Editorial Izd, Leningrado, VNIMI, 256 p.
- GRUBER, S.; HOELZLE, M. 2001: Statistical modelling of mountain permafrost distribution: local calibration and incorporation of remotely sensed data. *Permafrost and Periglacial Processes* 12, 69–77.
- HUTCHINSON, J. N. 1968: Mass Movement. *Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold, New York, 688-695.
- HUTCHINSON, J. N. 1988: Morphology and geotechnical parameters or landslides in relation to geology and hydrogeology. In: Fifth International Symposium on landslides. Lausanne, 3-35.
- PETLEY, D. N.; DUNNING, S. A.; ROSSER, N. J. 2005: The analysis of global landslide risk through the creation of a database of worldwide landslide fatalities. In: Hungr, O.; Fell, R.; Couture, R.; Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide risk management*. Taylor & Francis Group, Vancouver.
- SCHUSTER, R. L. 1996: Socioeconomic significance of landslides. In: Turner, A. K., Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Washington, 12–35.
- VARNES, D. J. 1958: Landslides types and processes. Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., 20-47.
- VARNES, D. J. 1978: Slope movement types and processes. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R. J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., 11-33.
- VARNES, D. J. 1984: *Landslide hazard Zonation. A Review of Principles and Practice*. UNESCO Press, Paris, 63 p.
- VOIGHT, B. 1989: Relation to describe rate-dependent material failure. *Science* 243(4888): 200–203.

Domingos M. Dos Santos Neves-Margarida
Máster en Ciencias Técnicas. Catoca S.A. Angola.

dnevesm2000@yahoo.es

Rafael Guardado-Lacaba
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Departamento de Geología. Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa. Cuba.

rguardado@ismm.edu.cu