

Deslizamiento de taludes en el yacimiento kimberlítico de Catoca, Angola

Domingos M. dos Santos Neves
Rafael Guardado Lacaba

Resumen

Desde su apertura, el complejo minero diamantífero kimberlítico de Catoca manifiesta inestabilidad en sus taludes y cortes, lo que promueve deslizamientos durante el proceso de explotación. En el presente trabajo se hace un análisis de los mecanismos que desencadenan los movimientos para proponer métodos y metodologías de estabilización. Se pudo establecer que los deslizamientos están asociados a diversas y complejas causales y condicionales y que son de dos tipos: estructurales, cuando la rotura es por un bloque de rocas que falla a través de una superficie determinada de deslizamiento, y plásticos, cuando el desplazamiento de la masa de roca o suelos se realiza de manera viscoso - plástica. Los principales riesgos asociados con estos deslizamientos en la mina de Cotoca son la obstrucción y rotura de la red de caminos mineros, la inestabilidad de los cortes, así como las afectaciones en los sistemas de desagüe y drenajes y en las labores de extracción.

Palabras clave

Geomecánica; deslizamientos; estabilidad de taludes; minería del diamante; yacimiento Cotoca.

Slope landslides in the kimberlite ore body of Catoca, Angola

Abstract

Since its opening, the Catoca kimberlite diamond mining complex (Angola) is showing evidence of instability of slopes and crosscuts; which triggers landslides during mining operations. This work analyzes the mechanisms provoking the movements in order to recommend stabilization methods and methodologies. It was determined that causes and conditions of landslides are diverse and complex and they can be: structural, when the failure occurs as a result of a block of rocks falling through a given landslide surface; and plastic, when masses of rocks or soil displace by flowing as a viscous-plastic fluid. The risks associated with landslides occurring in the Cotoca mine are basically interruption and damage to access roads, instability in crosscuts in addition to disruption to the drainage network and mining operations.

Key words

Geomechanics; landslide; slope stability; diamond mining; Catoca ore body.

1. INTRODUCCION

Angola se ha convertido en el cuarto país productor de diamantes del mundo; el complejo minero kimberlítico de Catoca representa la única mina activa de este tipo en el país. Ubicado en la provincia de Lunda-Sul, el yacimiento kimberlítico se localiza a 30 km de la ciudad de Saurimo, capital de la provincia. Limita al norte con las provincias de Lunda-Norte, al sur con Moxico, al oeste con Malange y al este con la República Democrática del Congo (Figura 1).

En el escudo Cassai, donde se ubica la mina, son conocidas más de 70 chimeneas, las que han sido agrupadas en cuatro campos: Camafuca-Camazamba (19 chimeneas), Camútue (15 cuerpos), Camagia (8) y Catoca (32). La mina de Catoca se localiza en la margen derecha del río Lucapa, que corre según una falla extensional NE-SW del Cretácico (Janse & Sheahan 1995; Reis 1972; De Carvalho *et al.* 2000; Guiraud *et al.* 2005).

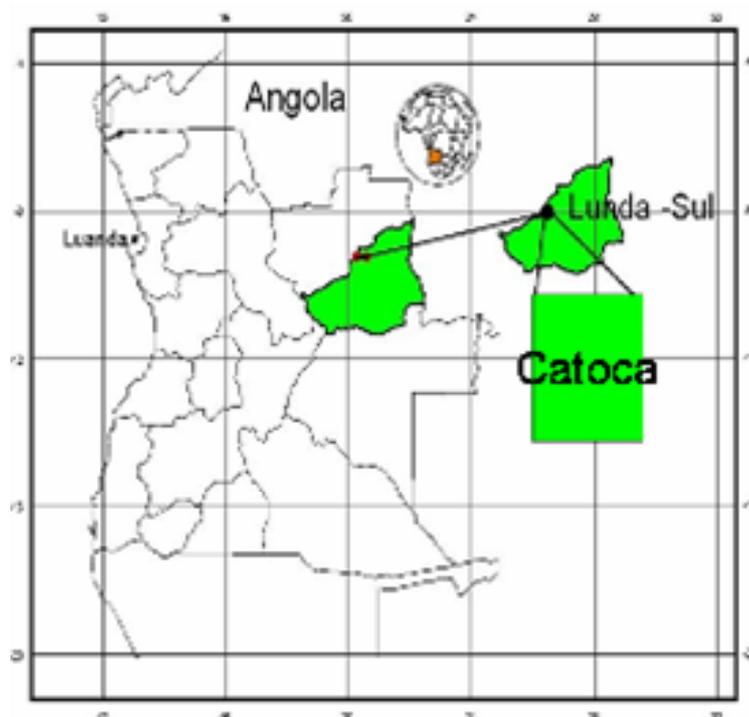


Figura 1. Localización geográfica del yacimiento de kimberlitas de Catoca, en Angola.

Se desconocen las causales y condicionales que están originando los deslizamientos en el yacimiento de Catoca, y se pretende a través de este estudio identificarlas para abordar la estabilización de los taludes

y la explotación viable del yacimiento. De ahí que el objetivo de la investigación sea caracterizar y evaluar desde el punto de vista ingeniero-geológico y geotécnico los movimientos de masa que tienen lugar en los taludes y cortes de la mina de Catoca.

En la literatura especializada sobre este tema (Varnes 1984; Corominas *et al* 1992; IEG-Commission Landslides 1990; ITC 2001) aparecen varias clasificaciones para los deslizamientos, sin embargo no abundan referencias sobre geotecnia minera y estabilización de taludes en yacimientos de tipo kimberlítico. El propósito del trabajo es dar a conocer los mecanismos de deslizamiento para la mina de Catoca como premisa para establecer posteriormente métodos y metodologías de estabilización de taludes y cortes según el tipo de minado.

2. GEOLOGIA DEL YACIMIENTO DE CATOCA

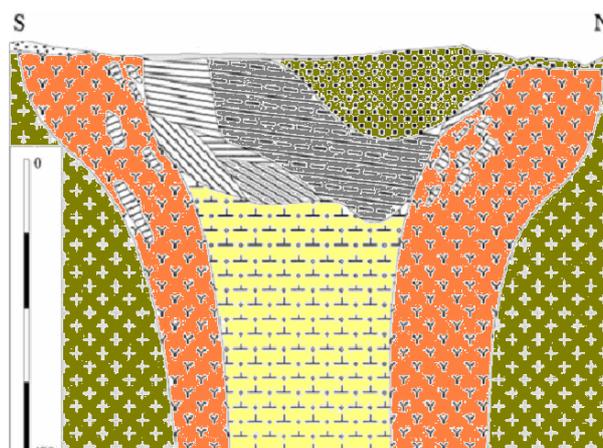
El kimberlito de Catoca ocupa un área de 639 000 m² y clasifica, dentro de las kimberlitas, en el grupo-I (Mitchell 1973, 1989, 1995, 1997, 2009). El cráter completo y la facies de diatrema (Figura 2) han sido reconocidos (Ganga *et al.* 2003; Robles *et al.* 2009) de acuerdo con los criterios de clasificación dados por Clement & Skinner (1985) y modificados por Smith *et al.* (2008).

El kimberlito se describe petrográficamente como una formación de rocas vulcanogénicas diamantíferas 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.

El tubo kimberlítico y las rocas vulcanógenas sedimentarias diamantíferas de la facies lateral del yacimiento, genéticamente están vinculadas con la formación del propio cuerpo mineralizado y aparecen representadas por brechas kimberlíticas con textura maciza, brechas kimberlíticas autolíticas, tobas kimberlíticas, brechas tobáceas y tobas gravelíticas con intercalaciones de areniscas tobáceas, areniscas, tobas aleurolíticas, arcillas, rocas kimberlíticas de la zona de transición y del substrato del complejo vulcanogéno-sedimentario saturadas

abundantemente con los xenolitos de los gneis encajantes, la llamada "zona xenolítica".

Las principales rocas encajantes (gneis) tienen una composición feldespática-piroxenítica con intercalaciones de cuarcitas y esquistos cuarzo-biotíticos; presentan diferentes grados de meteorización y desintegración, desde saprolitos hasta las variedades monolíticas altamente resistentes. Sus contactos con las rocas kimberlíticas son acentuados, con paredes abruptas hasta subverticales. La cobertura meteorizada de los gneiss encajantes en el sector oeste de la chimenea presenta una determinada zonación. En la parte superior del perfil las rocas están sujetas a una profunda descomposición química, representada por saprolitos de color pardo rojizo, raramente anaranjado, arcillas, areniscas densas, resistentes, poco plásticas e hidrófugas (UNEGEO 2000; Zinchenko 2009).



Leyenda:

-  Sedimentos aluviales recientes
-  Areniscas de la formación Kalahari
-  Areniscas interformacionales.
-  Kimberlito hipabisales (HK).
-  Tobas kimberlíticas (RVK)
-  Kimberlito Vulcanoclásticas sedimentadas (RVS)
-  Zona de transición(RVK) y (HK)
-  Roca madre

Figura 2. Perfil del tubo de kimberlito de Catoca (adaptado de Ganga *et al.* 2003; Robles *et al.* 2009).

3. METODOLOGÍA

Para evaluar los deslizamientos en el yacimiento kimberlítico de Catoca se realizó un estudio de las condiciones ingeniero-geológicas con el fin de diagnosticar en el polígono minero la geodiversidad, condiciones de estabilidad, causales y condicionales de los deslizamientos, así como para identificar la tipología de los movimientos de masa en el yacimiento, todo ello con la finalidad de establecer un ordenamiento minero ambiental estable de construcción y explotación de los taludes.

Se estudiaron los sistemas de drenaje superficial y subterráneo, así como otros factores que favorecieran el movimiento de las rocas en los taludes y cortes de la mina. Se propuso entonces que el estudio ingeniero-geológico de estabilización de los taludes como apoyo al Plan Director Minero Técnico (PDMT) en la mina de Catoca estaría basado en cuatro etapas de trabajo denominadas como módulos:

- Módulo I: Inventario. Investigaciones geotécnicas preliminares
- Módulo II: Diagnóstico. Elaboración de un plan detallado de investigación
- Módulo III: Pronóstico. Análisis del mecanismo de fallo. Análisis del modelo de estabilidad (equilibrio).
- Módulo IV: Evaluación de la estabilización del talud. Examen del factor de seguridad. Plan de actividades y medidas ingenieras.

Como derivación de lo anteriormente propuesto se identificaron algunas líneas de trabajo que contribuyen a mejorar los procedimientos de cartografía, la calidad de las evaluaciones y la predicción de los riesgos. En cuanto a la forma de perfeccionar los modelos de probabilidad espacial (susceptibilidad) existen varias alternativas que podrían mejorar los resultados en las predicciones, tales como:

- Realizar catálogos de deslizamientos en la zona de estudio de manera que se pueda tener la cobertura completa de los lugares afectados por deslizamientos.
- Considerar todos los indicadores geomecánicos disparadores o desencadenantes; mejorar la calidad y precisión de las variables utilizadas, por ejemplo, la resolución de determinadas variables continuas como las derivadas de los modelos digitales del terreno; o bien, delimitar con mayor exactitud los límites de las variables categóricas.

- Determinar con exactitud la frecuencia de los deslizamientos pasados en las zonas de estudio con el fin de que las estimaciones de frecuencias futuras sean lo más consistente posibles.

La generalización y estandarización de los métodos de evaluación del riesgo por deslizamientos facilitará desarrollar medidas de prevención y mitigación que permitirán reducir los daños debidos a este fenómeno, así como disponer de mejores herramientas para el ordenamiento del territorio.

La Figura 3 muestra el modelo conceptual metodológico de las investigaciones geotécnicas que han de ejecutarse en la mina de Catoca para el estudio de los deslizamientos.

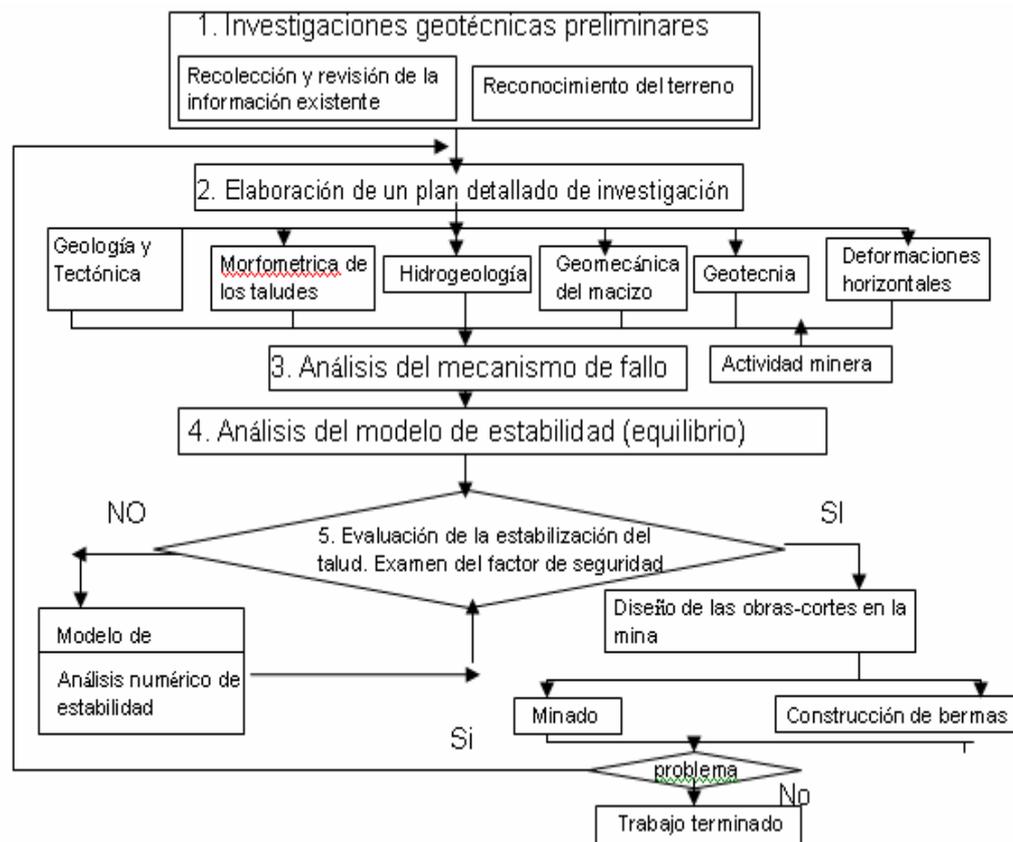


Figura 3. Modelo conceptual metodológico de la investigación para la estabilización de los taludes de la mina de Catoca (Angola).

El diagnóstico de los deslizamientos se basa en el inventario y reconocimiento de las condiciones ingeniero-geotécnicas del terreno y de los

taludes deslizados o con peligro de fallo; está orientado a la caracterización de las variables e indicadores ingeniero-geológicos o geotécnicos.

El pronóstico establece la intervención necesaria del control de la peligrosidad y del riesgo de las áreas deslizadas, posibles zonas de fallo, y el análisis y control de los taludes con posibilidades de fallar.

Los procedimientos y herramientas aplicables a la mejoría de los modelos de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo por deslizamientos pueden resultar también útiles para el análisis de otros procesos geológicos potencialmente peligrosos, cuya distribución en el territorio esté condicionada por factores susceptibles de expresión espacial.

4. RESULTADOS

4.1 Mecanismos de deslizamientos en la mina de Catoca

Los deslizamientos de taludes que se producen en la mina kimberlítica de Catoca se asocian a mecanismos que responden a diversas y complejas causales y condicionales del fallo, de su movilidad y su dinámica.

Los principales riesgos asociados a los fenómenos de deslizamiento en Cotoca están relacionados con la obstrucción y rotura de la red de caminos mineros, la inestabilidad de los cortes, las afectaciones en los sistemas de desagüe y drenajes, y de las labores de extracción.

La existencia de una potente corteza de meteorización con un alto grado de agrietamiento de sus rocas y suelos, grandes volúmenes de agua subterránea, baja resistencia y alta deformabilidad del medio geológico contribuyen a la rotura del equilibrio en los taludes y cortes y, por consiguiente, al surgimiento e intensificación de los procesos de deslizamiento en la mina (Almaguer & Guardado 2005).

Los sectores superiores de la mina están conformados por rocas de la formación Calahári, que varían de color desde el pardo rojizo al violeta. Generalmente son areniscas finas muy alteradas, raramente arcillosas, hasta arenas arcillosas, secas, ligeramente sedimentadas, con pequeña resistencia estructural, que se pierde en contacto con

el agua. Se observa una intensa erosión denominada erosión por sifonamiento (Figura 5) que provoca un acarreamiento muy característico; durante este proceso las aguas subterráneas actúan intensamente arrastrando las partículas finas y muy finas y creando cavidades que llegan a transformarse en grandes cárcavas que alteran en gran medida la estabilidad de los taludes.

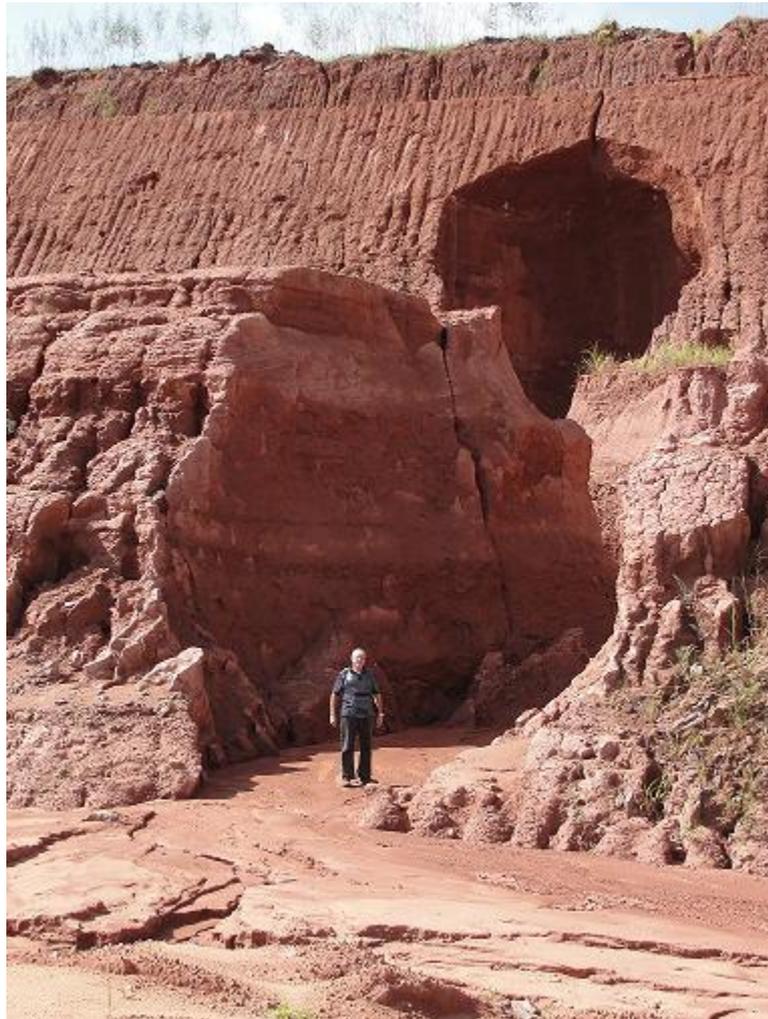


Figura 5. Erosión en cárcavas en los taludes de la mina Catoca (Foto del autor, 2010)

Se pudo establecer que los deslizamientos en la mina de Cotoca se producen por dos mecanismos fundamentales:

1. *Estructural*: cuando la rotura se produce por un bloque de rocas que falla a través de una superficie determinada (Figura 6).
2. *Plástico*: cuando el desprendimiento de la masa de roca o suelo se produce de manera viscoso-plástica (Figura 7).



Figura 6. Foto que muestra los deslizamientos estructurales con superficies en cuña en la mina de Catoca.



Figura 7. Foto que muestra los deslizamientos plásticos con superficie circular.

Teniendo en cuenta que los movimientos de taludes pueden ser clasificados a partir de distintos criterios (Alcántara–Alaya 2000), se propone una caracterización tipológica de los deslizamientos ocurridos en la zona de estudio.

4.1.1. Deslizamientos a través de una superficie de fallo

Estos deslizamientos ocurren en los taludes de la cantera a través de una o más superficies de rotura o zonas de fallos. El mecanismo de deslizamiento se produce según el tipo de roca, su agrietamiento, alteración, acción de las aguas subterráneas, deformabilidad y resistencia. Por su tipología se han subdividido en:

- *Deslizamientos por una superficie plana*

Estos deslizamientos tienen lugar a través de una superficie plana inclinada; ocurren cuando la inclinación del talud es superior a la resistencia de los estratos y como condicional existe la presencia de agua. Su estabilidad está en función del ángulo de buzamiento de las grietas y del corte del banco en la mina (Figura 8). En Catoca este tipo de deslizamiento tiene lugar en los gneiss alterados y agrietados. Las discontinuidades geológicas en el macizo rocoso constituyen también planos de debilidad, lo que unido a la percolación de las aguas de lluvia y a su empuje hidrodinámico provocan el surgimiento y desarrollo de los deslizamientos.



Figura 8. Deslizamiento por una superficie plana en los cortes de la mina de Catoca.

- *Deslizamientos en cuña*

Se observan en el sector norte y noroeste de la mina. Los deslizamientos en cuñas son desplazamientos de grandes proporciones que tienen lugar en la cantera de Catoca; aparecen asociados a los gneiss extremadamente agrietados y meteorizados y se originan cuando dos discontinuidades están dispuestas oblicuamente a la superficie del talud y la línea de intersección de ambas aflora en la superficie del mismo con un buzamiento en sentido desfavorable de manera que logra vencer la resistencia al cortante de los gneiss.

- *Deslizamientos a través de una superficie circular*

Los deslizamientos a través de una superficie circular tienen lugar en los taludes que conforman los suelos lateríticos del cuerpo mineral (Figura 9). El mecanismo de desplazamiento se produce a través de una superficie de rotura circular, curvilínea o cóncava en la que se produce un movimiento rotacional. El material de la cabecera de los escalones se inclina contra la ladera generando depresiones paralelas a la corona del talud a través de las que se infiltran las aguas superficiales y pueden ocasionar reactivaciones.



Figura 9. Deslizamiento de tipo circular en la mina de Catoca.

Como generalmente en estos tipos de movimientos hay agua entre el suelo y las grietas, en la parte frontal del cuerpo del deslizamiento evoluciona un bloque que en muchos casos se convierte en una colada de suelo. En la Figura 9 se observan las zonas donde han ocurrido deslizamientos circulares en suelos debajo de los que hay agua subterránea. La variabilidad en las propiedades de resistencia, humedad y permeabilidad generan problemas de inestabilidad de los taludes en la mina de Catoca. Vale decir que la resistencia de los suelos juega un papel importante en el fallo del talud.

- *Deslizamientos traslacionales*

Los deslizamientos traslacionales en la mina de Catoca tienen lugar a través de una superficie de fallo semiplano con una cierta inclinación de diez a quince grados, combinado con movimientos de rotación en las partes superiores. Estos deslizamientos están controlados en la mina de Catoca por la estratificación y el agrietamiento de las rocas, las que inciden en la variación de la resistencia; el deslizamiento se produce hacia fuera y hacia abajo. En el sector este de la mina estos movimientos se producen en los suelos y rocas del cuerpo mineral con alto grado de meteorización, precisamente donde la superficie de deslizamiento se encuentra en el contacto roca-suelo. Se ha podido comprobar que las aguas subterráneas durante la etapa de lluvia actúan como elemento lubricante y disparador.

- *Deslizamientos combinados*

En estos movimientos se conjugan normalmente dos mecanismos: rotacional-traslacional y rotacional-flujos. Siempre el primer mecanismo predomina sobre el segundo. En la mina de Catoca estos deslizamientos pueden tener distintas magnitudes, generalmente se presentan con una superficie de fallo rotacional que abarca un sector amplio de la mina.

4.1.2. Deslizamientos de tipo plásticos

Comprenden aquellos deslizamientos en los que el movimiento de los suelos responde a su alta plasticidad y a la presión de poros que se genera en este tipo de suelo arcilloso

- *Deslizamientos de flujos*

Están relacionados con las líneas de fallas tectónicas en los distintos tipos de rocas del cuerpo mineral; precisamente en los suelos de cobertura se ponen de manifiesto estos movimientos debido a el comportamiento plástico y fluido de los suelos arcillosos presentes en la mina. Cuando se desarrollan en materiales finos como las areniscas de la formación Kalahari la masa de suelo que se desplaza toma formas lobuladas.

El límite de la masa que se mueve y la que permanece "in sito" está demarcado por una franja estrecha en la que se producen movimientos diferenciales o con diferente distribución de la resistencia al corte (Figura 10). Estos deslizamientos se generan en la mina en los periodos de lluvia, y por el efecto de empuje de las aguas subterráneas se convierten en avalanchas de suelo y roca de mediana proporción.



Figura 10. Deslizamientos de flujos en la mina de Catoca.

5. CONCLUSIONES

En mina de Cotoca se identificaron dos tipos de mecanismos de deslizamientos: estructurales, cuando la rotura es por un bloque rocas que falla a través de una superficie de deslizamiento; y plásti-

cos, cuando el desplazamiento de la masa de roca o suelos se realiza de manera viscoso - plástica.

La erosión por sifonamiento, típica de este tipo de suelo, se produce en aquellos suelos arenosos-arcillosos residuales de cobertura de la mina. En los taludes superiores tiene lugar un proceso intenso de erosión que origina acaravamientos de enormes proporciones.

Los deslizamientos más comunes en la mina de Catoca son los desprendimientos de rocas y suelos; los deslizamientos traslacionales; deslizamientos en cuña; deslizamientos combinados y movimientos de flujos. Los principales riesgos asociados a estos deslizamientos en Cotoca están relacionados con la obstrucción y rotura de la red de caminos mineros, la inestabilidad de los cortes, las afectaciones en los sistemas de desagüe y drenajes, y de las labores de extracción.

La mina de Catoca requiere de un sistema de gestión de riesgos que permita establecer taludes más estables, lo que conduciría a una mejor y más racional explotación basada en un sistema de ordenamiento territorial y minero ambiental responsable.

6. AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer al director general de la Sociedad Minera de Catoca Lda. por las facilidades brindadas en la ejecución de las investigaciones geotécnicas y la beca otorgada para la realización de doctorados en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Al Departamento de Exploración y Explotación Minera de Catoca Ldt., por su apoyo. Al Dr. José A. Batista Rodríguez por su paciente y acertada revisión del artículo.

7. REFERENCIAS

- ALCÁNTARA-ALAYA I. 2000: Deslizamientos o movimientos de terrenos? Definiciones, clasificaciones, terminología e investigaciones. *Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM* 41 :7-21.

- ALMAGUER Y, GUARDADO R. 2005: Caracterización ingeniero geológica del perfil de meteorización de rocas ultra básicas serpentínizadas en el territorio de Moa, Cuba. *Minería & Geología* 21(3) :21-34. Disponible en: <http://www.revista.ismm.edu.cu>
- CLEMENT, C.R. & SKINNER, E.M.. 1985: A textural-genetic classification of kimberlites. *Transactions of the Geological Society of South Africa* 88 : 403–409.
- COROMINAS, J; BAEZA C. & SALUETA, L. 1992: The influence of geometrical slope characteristics and land use on the development of shallow landslides. In: Bell, D:H (Eds) Proceeding of the 6th International Symposium of Landslides. 10–14 Feb, Christchurch, New Zealand. A.A Balkema Pub. Rotterdam. The Netherlands pp 919-924.
- CARVALHO, H.; TASSINARI, C. & ALVES, P.H. 2000: Geochronological review of the Precambrian in western Angola: links with Brazil. *Journal of African Earth Sciences* 31 (2): 383–402.
- GANGA, J.; ROTMAN, A.Y. & NOSIKO, S. 2003: Pipe Catoca, an example of the weakly eroded kimberlites from North-East of Angola. The 8th International Kimberlite Conference, Extended Abstract.
- GUIRAUD, R.; BOSWORTH, W.; THIERRY, J.; DELPLANQUE, A. 2005: Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: an overview. *Journal of African Earth Sciences* 43 :83–143.
- IEG-Commission Landslides 1990: Suggested Nomenclature for landslides. *Bulletin of the International Association Engineering Geology* 41 :13-16.
- ITC, 2001. ILWIS 3.0 Academic - User's Guide. ITC, Enschede, Netherlands, 520 pp.
- JANSE, A.J. & SHEAHAN, P.A. 1995: Catalogue of world wide diamond and kimberlite occurrences: a selective and annotative approach. *Journal of Geochemical Exploration* 53 :73–111.
- MITCHELL, R.H. 1973. Magnesian ilmenite and its role in kimberlite petrogenesis. *Journal of Geology* 81: 301–311.
- MITCHELL, R.H. 1989. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York, Plenum Press. 442 pp.
- MITCHELL, R.H. 1995. Kimberlites, orangeites, and related rocks. NewYork, Plenum Press. 410 pp.
- MITCHELL, R.H. 1997. Kimberlites, orangeites, lamproites, melilitites, and minettes: a petrographic atlas. Almaz Press Inc, Ontario.

- MITCHELL, R.H. 2009: Tuffisitic kimberlites from the Wesselton Mine, South Africa: Mineralogical characteristics relevant to their formation. Proceedings of the 9th International Kimberlite Conference. *Lithos* 112S, 452–464.
- REIS, B. 1972: Preliminary note on the distribution and tectonic control of kimberlites in Angola: The 24th International Geological Congress - Section 4, pp. 276–281.
- ROBLES, SANDRA; MANUEL WATANGUA; LEONARDO ISIDO; JOAN C. MELGAREJO; SALVADOR GALÍ; ANTONIO OLIMPIO 2009: Contrasting compositions and textures of ilmenite in the Catoca kimberlite, Angola, and implications in exploration for diamond *Lithos* 112S :966–975
- SMITH, B.H.; NOWICKI, T.E.; RUSSELL, J.K.; WEBB, K.J.; HETMAN, C.M.; HARDER, M. & MITCHELL, R.H. 2008: KIMBERLITES: Descriptive Geological Nomenclature and Classification. 9th International Kimberlite Conference Extended abstract No.9IKC-A-00124.
- UNEGEO, ENDIAMA/DKIKATALMAZ ODKBRECHT Mining Service Ing.: 2000, Proyecto Catoca, Informe, Republica Popular de Angola 146 pag.
- VARNES, D.J. 1984: Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice. UNESCO, IAEG, Darantiere, Paris, 61 pp.
- ZINCHENKO V. N. 2009: Morphology of diamonds from kimberlite pipes of the Catoca field, *Angola Journal Geology of Ore Deposits* 50 (8) :806-814. DOI 10.1134/S1075701508080199

Domingos Mateus dos Santos Neves Margarida
Máster en Ciencias. Cursante de Doctorado. Departamento de Geología ISMM Moa. Sociedad Minera de Catoca, Lda, Angola

margarida@catoca.com
dnevesm2000@yahoo.es

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

rguardado@ismm.edu.cu
rguardado46@yahoo.com