

Casos históricos de ruptura de presas de relaves en Brasil: propuesta de geoindicadores para el monitoreo

N.C. Diniz, E.A. Beirigo, I.C. Matheus, L.F.M. Ribeiro y L.M.C. Tejada

Universidade de Brasília-UnB. 70910-900. Brasília/DF. Brasil

E-mails: noris@unb.br - eabeirigo@yahoo.com.br - icmatheus@yahoo.com.br - lmartins@unb.br - tejada@unb.br

RESUMEN

En la industria mineral existe la técnica de construcción de presas construidas con los propios relaves del proceso de extracción, para posteriormente sean ellos mismos dispuestos y contenidos dentro de aquellas estructuras. Al hacer un levantamiento histórico de aquel método de disposición, se pueden identificar varios casos de rupturas en todo el mundo a lo largo de los últimos años. Mediante el estudio de casos históricos de rupturas, ha sido posible identificar características geológico-geotécnicas que indican, a lo largo del tiempo, la susceptibilidad a la ocurrencia de estos eventos. En este trabajo son propuestos geoindicadores como herramientas para el monitoreo de presas de relaves. Esta propuesta es fundamentada, especialmente, en los análisis de las rupturas ocurridas en Brasil en los últimos años.

Palabras clave: Brasil, geoindicadores, presas de relaves

Historical cases of tailing dams failure in Brazil: propose of geoindicators for monitoring

ABSTRACT

Tailings dams are very common in mining activities. Analysing these structures, one can find several cases of failure reported along the years in different parts of the world. Studying some historical cases of tailings dam failures, one can identify the geological and geotechnical characteristics which may indicate the susceptibility to the occurrence of these events. Geoindicators are proposed to be used as tools for tailings dams monitoring in this work. This proposal is based on the analysis of the failures occurred in Brazil in the last few years.

Key words: Brazil, geoindicators, tailing dams

Introducción

La posibilidad de construir presas hechas con los propios relaves que van a ser contenidos posteriormente, es una alternativa muy utilizada en minería. Al hacer un levantamiento del histórico de estas estructuras, se pueden identificar varios casos de rupturas en todo el mundo a lo largo de los últimos años. Además, del impacto físico y económico provocado por las rupturas de estas presas y la liberación de masas contenidas en ellas, por las características químicas de los relaves el daño ambiental puede ser todavía mayor. El monitoreo del comportamiento de estas estructuras, durante y después de su vida útil, es un factor importante a ser observado en el planeamiento de medidas de control y seguridad.

Técnicas de diseño y ejecución de presas de contención de relaves son bastante difundidas teniendo

como principales variables: el método de construcción empleado y las características geotécnicas del material a ser contenido. Estos factores son muy importantes en el inicio de la fase de diseño, predominándose el cálculo de la geometría general de la presa, sistema interno de drenaje y protección, por otro lado las condiciones de cimentación, características socio-económicas y ambientales del entorno ayudan a determinar la ubicación de la estructura. En informes sobre rupturas de presas encontrados en la literatura mundial, puede verificarse que gran parte de ellas está relacionada, principalmente, a factores como: método constructivo, geometría de la presa, sistema de drenaje, filtración interna, cimentación y agentes naturales (p.e. terremotos y tempestades). El estudio de estas rupturas ha posibilitado discusiones al respecto de la seguridad de estas estructuras y el surgimiento de propuestas de medidas de control.

Al estudiarse casos históricos de rupturas, fundamentados en la metodología comparativa y generalizada de análisis, ha sido posible identificar características geológico-geotécnicas que indican, a lo largo del tiempo, la susceptibilidad a la ocurrencia de estos eventos. Técnicas de investigación e instrumentación geotécnica, ampliamente conocidas, son muchas veces subutilizadas. En este trabajo, intentando superar este hecho, son propuestos geoindicadores como herramientas de monitoreo de presas de relaves. Esta propuesta es fundamentada, especialmente en el análisis de rupturas ocurridas en Brasil en los últimos años.

Metodología

Los estudios para identificación de geoindicadores para el monitoreo de presas de relaves se iniciaron con el análisis de trabajos de conocimiento general como los publicados por el Comité Internacional de Grandes Presas (1999) y por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (1994). Sin embargo, para detallar otros casos fue utilizada una bibliografía más específica, como las ejemplificadas en la Tabla 1. A lo largo de esta investigación, se generó un banco de datos sobre las más grandes rupturas ocurridas en los últimos 45 años, contabilizando mecanismos de ruptura, agentes detonadores, método de construcción, materiales de construcción y materiales contenidos. Especialmente, el estudio de rupturas ocurridas en los últimos 20 años fueron catalogadas informaciones de instrumentos de monitoreo adoptados, geometría general de la presa, sistema de drenaje, filtración interna, cimentaciones y entorno ambiental.

Se debe resaltar que este trabajo no tiene como objetivo totalizar todos los casos de ruptura de presas de relaves ocurridos en la historia y publicados en la literatura.

Con base en el estudio de tres casos de rupturas ocurridas en presas de relaves en Brasil (citadas anteriormente), se buscó identificar características geológico-geotécnicas del comportamiento de estas presas. Al final, es propuesta la utilización de estas características como geoindicadores para el monitoreo de su comportamiento a lo largo de su vida útil.

Panorama mundial

Fundamentado en el levantamiento de datos realizados en este estudio, se presenta en la Tabla 2 un panorama de los principales casos de ruptura de pre-

| Caso Histórico | Referencia bibliográfica |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mina do Fernandinho Brasil (1986) | Parra, P.C. y Lasmar, N.T. 1987. <i>Ruptura da barragem de rejeitos da Mina do Fernandinho</i> . |
| Pico São Luiz Brasil (1986) | Parra, P.C. y Ramos, J.V. 1987. <i>Ruptura, recuperação e estabilização da barragem de rejeitos da Mina do Pico São Luiz</i> . |
| Stava Italia (1985) | R. J. Chandler y G. Tosatti. 1995. <i>The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985</i> . Proceedings. |
| Omai Guiana (1995) | Morgenstern, N.R. 2001. <i>Geotechnics and mine waste management-update</i> . |
| Los Frailes España (1998) | Martínez, A.G. y Gomez, D.C. 2002. <i>Geomecánica de la ruptura de la presa de residuos de Aznalcóllar y sus consecuencias medio ambientales</i> . |
| Aitik Suiza (2000) | Göransson, T. et al. 2001. <i>Dam failure at the Aitik mine: Investigations, conclusions and measures taken</i> . |
| Baia Mare Rumania (2000) | Penman, A.D.M. 2001. <i>Risk analyses of tailings dam construction</i> . |
| Inez USA (2000) | <i>The Inez coal tailings dam failure (Kentucky, USA)</i> http://www.wise-uranium.org/mdafin.html (2005). |
| Mineração Río Verde Brasil (2001) | Gomes, R.C. et al. 2001. <i>Laudo pericial da ruptura do dique de contenção de rejeitos de minério de ferro da cava C1 da Mineração Rio Verde Ltda, localizada no município de Nova Lima / M.G.</i> |

Tabla 1. Casos históricos de ruptura estudiados y principales bibliografías utilizadas

Table 1. Historical cases of failures studied and main bibliographic sources used

sas de residuos en el mundo, durante los últimos 40 años. Para cada caso, se busco identificar las causas y los agentes desencadenadores de la ruptura.

Casos estudiados

Presa de la Mina de Fernandinho - Brasil (Parra y Lasmar, 1987)

La presa de relaves de la Mina de Fernandinho es propiedad de Itaminas Comercio de Minérios S/A y está ubicada en el municipio de Itabirito/MG. En la época del accidente, la presa estaba con aproximadamente 40 m. de altura y con un nivel de relaves a 2 m. por

| Fecha de la ruptura | Empresa minera | Presa / Localización | Tipo de mineral | Método constructivo | Tipo de accidente | Causas de la ruptura | Agentes desencadenadores |
|---------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3/10/2003 | Cia Minera Cerro Negro | Cerro Negro, Chile | Cobre | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | - | - |
| 22/6/2001 | Minera Río Verde Ltda | Minas Gerais, Brasil | Hierro | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Ineficiencia del sistema de drenaje interno de la presa | Elevación del nivel de agua próximo a la presa |
| 8/9/2000 | Boliden Ltda | Aitik mine, Gällivare, Suecia | Cobre | - | Ruptura general de la presa | - | Elevación de las fuerzas de percolación en relación a las fuerzas de interacción entre las partículas |
| 10/3/2000 | Remin S.A. | Borsa Mare, Rumania | Zinc | - | Ruptura general de la presa | - | Lluvia intensa |
| 30/1/2000 | Aurul S.A. | Baia Mare, Rumania | Oro | Inicio Aguas Abajo y continuación Aguas Arriba | Ruptura en la cresta de la presa | - | Lluvia intensa, seguida de sifoneamiento en la presa "piping" |
| 25/4/1998 | Boliden Ltd., Canada | Los Frailes, Aznalcóllar, España | Zinc, Cobre y Plata | - | Ruptura de la cimentación de la presa | Resistencia del material de cimentación | - |
| 22/10/1997 | BHP Copper | Pinto Valley, Arizona, USA | Cobre | - | Ruptura del talud aguas abajo de la presa | - | - |
| 1/5/1996 | - | Sgurigrad, Bulgaria | Zinc, Cobre y Plata | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Lluvia intensa |
| 19/8/1995 | Cambior Inc., Canada; Golden Star Resources Inc., USA | Omai, Guinea | Oro | - | Ruptura general de la presa | Elevación del nivel de agua próximo a la presa | Sifoneamiento "Piping" |

Tabla 2. Panorama mundial de las principales rupturas ocurridas
 Table 2. World panorama of main tailing dams failures

| Fecha de la ruptura | Empresa minera | Presa / Localización | Tipo de mineral | Método constructivo | Tipo de accidente | Causas de la ruptura | Agentes desencadenadores |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 05/86 | Itaminas Comercio de Minerios | Fernandinho, Minas Gerais, Brasil | Hierro | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Inclinación excesiva del talud aguas abajo de la presa | Reducción gradual de la operabilidad del sistema de drenaje interno de la presa |
| 2/10/1986 | Mineração Pico São Luiz | Pico São Luiz, Minas Gerais, Brasil | Hierro | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Método constructivo de la presa inadecuado | |
| 3/3/1965 | Compañía Minera Cerro Negro | Cerro Negro No.4, Chile | Cobre | Aguas Arriba / Línea de centro (combinación) | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Sismo |
| 27/3/1965 | - | Bellavista, Chile | Cobre | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | - | Sismo |
| 28/3/1965 | Compañía Minera Cerro Negro | Cerro Negro No.3, Chile | Cobre | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Sismo |
| 28/3/1965 | ENAMI Empresa Nacional de Minería | El Cobre New Dam, Chile | Cobre | Aguas Abajo | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Sismo |
| 29/3/1965 | ENAMI Empresa Nacional de Minería | El Cobre Old Dam, Chile | Cobre | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Sismo |
| 28/3/1965 | - | La Patagua New Dam, Chile | Cobre | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Sismo |
| 28/3/1965 | - | Los Maquis, Chile | Cobre | Aguas Arriba | Ruptura general de la presa | Licuefacción de los relaves | Sismo |

Tabla 2 (bis). Panorama mundial de las principales rupturas ocurridas
 Table 2 (bis). World panorama of main tailing dams failures

debajo de la cresta. La presa presentaba diversos compartimentos en los cuales los relaves eran distribuidos de forma aleatoria.

El desecho producido era proveniente de los procesos de extracción de hierro y consistía en una arena muy fina, limosa, con proporciones de finos de hierro que variaban de un lugar a otro, con muy poca arcilla y algo de mica. Estos relaves eran lanzados en puntos lejanos del cuerpo de la presa, haciendo que la fracción fina se sedimentase cerca a la cresta. Las construcciones sucesivas eran realizadas aguas arriba, sobre los relaves sedimentados en el reservatorio, en capas de gran espesor (de 1 a 2 metros), sin una compactación adecuada (Figura 1).

La presa estaba ubicada en una zona de contacto de la cuarcita del Grupo Caraça e Itabirito de la Formación Cauê, ambos del Supergrupo Minas. El primero se encontraba en una posición sub-vertical, en la margen derecha del valle, con exposiciones elevadas y encontrándose intensamente fracturado. En los accesos de la margen izquierda, fue observada la roca filita de color gris claro, en transición con la zona del afloramiento del Itabirito. Se ha especulado sobre la existencia, en zonas cercanas, de depósitos de arenas resultantes del desgaste de la cuarcita, acumulados en la línea de drenaje, en caso sea de ocurrencia continua, podría haber sido un papel significativo en el estrato drenante.

La ruptura de la presa ocurrió el 16 de mayo de 1986, causando el movimiento de un volumen de material estimado de 350000 m³. Según el relato de personas que presenciaron el accidente, la ruptura ocurrió en dos etapas. En la primera, hubo ruptura lenta cerca de la ladera derecha, involucrando la zona inundada, seguida de un estallido, luego ocurrió el colapso total, originando una masa de lodo (Figura 2). En el momento del accidente, había cuatro equipos en la cresta de la presa que fueron arrastrados por la masa ya licuefactada, junto con sus operadores. Toda la vegetación y suelo superficial presentes en el camino de la ola de lodo fueron removidos, dejando una superficie con aspecto desértico.

En el estudio de este caso, no ha sido encontrado ningún informe de la existencia de instrumentos para monitoreo de la presa. Como esta no sufría incrementos en su altura, los dos años anteriores a la ruptura, fueron descartados el aumento de sobrecarga en la cuña activa y en la elevación de la presión piezométrica, como las posibles causas del accidente. Además, en el período de ruptura no había llovido y ni habían ocurrido detonaciones, existiendo como agente externo apenas la presencia de tres camiones y un tractor de carga que estaba funcionando cerca de la cresta.

El talud aguas abajo del trecho fracturado tenía una inclinación media de 42°, observándose algunas grietas longitudinales discretas en el resto del talud. Este ángulo de inclinación era semejante al ángulo de fricción interno efectivo para el material, obtenido en ensayos de laboratorio. Esta condición llevó a un factor de seguridad de deslizamiento cercano a 1.0 para el talud drenado. El compartimento del reservatorio donde ocurrió la ruptura, se encontraba con una lámina de agua de un metro.

Con el análisis de la situación y de los factores involucrados, se concluyó que el deslizamiento ocurrió debido al hecho de que, tanto la inclinación como la altura del talud no eran compatibles con la resistencia al cizallamiento del material y con las presiones piezométricas desarrolladas en el depósito de relaves. Aunque la presa se encontraba estable con esta inclinación y con esta altura por cerca de dos años, estos factores no pueden ser considerados como causas aisladas para el evento. Según los estudios, como la resistencia al cizallamiento no se alteró substancialmente en el período, el único factor que podría haberse modificado era el del nivel del agua en el

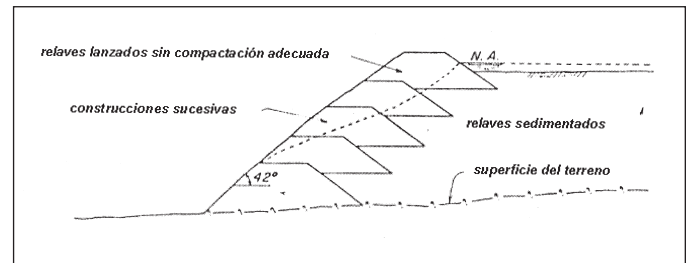


Fig. 1. Situación anterior a la ruptura (Parra y Lasmar, 1987)
Fig. 1. Situation prior to failure (Parra y Lasmar, 1987)

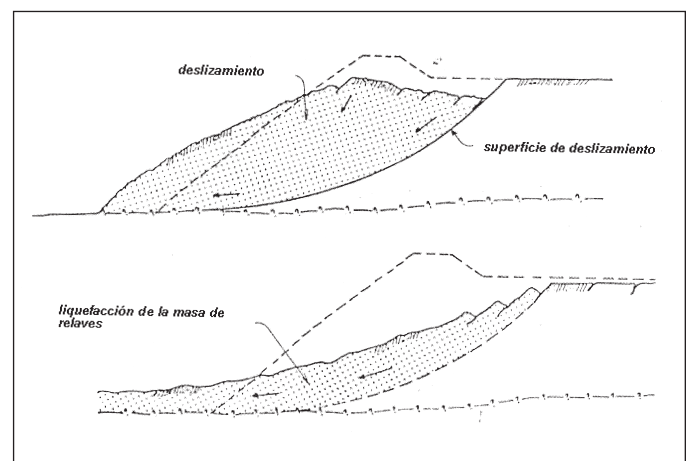


Fig. 2. Etapas de la ruptura (Parra y Lasmar, 1987)
Fig. 2. Failure stages (Parra y Lasmar, 1987)

reservatorio, adyacente a la presa. Como no habían ocurrido lluvias en el período, fue admitido que el sistema de drenaje existente en la fundación de la presa perdió, poco a poco, su eficiencia debido a la colmatación provocada por finos, ocurriendo la elevación de la línea piezométrica. Estos factores llevaron al talud a una situación crítica que, asociada al hecho de la presencia de cuatro equipos trabajando al mismo tiempo en la cresta de la presa, llevó a su ruptura.

Presa de la "Mina do Pico São Luiz" - Brasil (Parra y Ramos, 1987)

La presa empezó a operar hace 24 años conteniendo relaves provenientes de la explotación de la Mina do Pico São Luiz. Esta presa se encuentra localizada aguas arriba del ferrocarril Alegria - Fábrica EFVM.

La presa poseía, cerca de 20 metros de altura en la época de la ruptura y estaba prevista una altura final de 30 metros. Los taludes aguas arriba y aguas abajo presentaban una inclinación media de 1V:1.1H (42°), sin bermas intermediarias, con un ancho de cresta de 10.0 metros y 80.0 metros de largo. El cuerpo de la presa había sido construido a partir de incrementos sucesivos de 3.0 metros, mientras el reservatorio era colmatado. Estos incrementos eran realizados en la punta del relleno, con el material siendo lanzado en la cresta aguas abajo, sin una compactación adecuada. El nivel del agua del reservatorio era controlado por un vertedero en la ladera derecha, de manera que estaba siempre 3.0 metros abajo de la cresta de la presa, pudiéndose elevar hasta 1.5 metros, eventualmente.

El material utilizado en la construcción de la presa fue Itabirita (hierro) con características pobres, friable, con granulometría en la faja de arena fina y con fragmentos laminares de Itabirita dura. La cimentación de la presa, en zona de laderas, era formada por una costra de concreción laterítica muy resistente y de elevada permeabilidad, en cuanto que en el fondo del valle de la presa estaba apoyada sobre un depósito de arcilla blanda sedimentaria de aproximadamente, 7.0 metros de espesor.

La presa empezó a presentar problemas en junio de 1985 cuando un sector del relleno junto a la ladera izquierda se rompió, generando un desplazamiento del material de cimentación de 30.0 a 40.0 metros de distancia. La altura del relleno en este lugar era de 15.0 metros y la recuperación de este sector fue hecha por medio del lanzamiento de bloques de Itabirita dura. Sin embargo, se observó que el eje de la presa fue curvado hacia aguas arriba debido a la ocurrencia del surgimiento de agua en la salida del

relleno, significando así el lanzamiento de parte del material sobre el relleno acumulado en el reservatorio. Fue también ejecutada una plataforma con bloques de Itabirita, en el pie de la presa aguas abajo, intentando aumentar su estabilidad.

En una inspección realizada en la presa en julio de 1986, fue observada la existencia de una gran zona con salidas de agua abajo del relleno, que alcanzó 4.0 ó 5.0 metros arriba de la cota de la plataforma hacia aguas abajo. No fueron constatados indicios de la ocurrencia de arrastre de partículas sólidas, pues el agua se presentaba relativamente limpia. Fueron observadas también algunas grietas en el talud aguas abajo, a un metro de la cresta, ocurriendo debido a movimientos superficiales del material en polvo sobre la pendiente del relleno, sin descartarse la hipótesis de ocurrencia de movimientos más importantes. La zona central de la pendiente del relleno también se encontraba fracturada, aunque los movimientos ocurridos no fueron tan extensos como los del lado izquierdo. El talud se encontraba con grietas y salidas generalizadas de agua. Para el monitoreo de la presa, fueron ejecutados entonces tres sondeos a percusión en la cimentación aguas abajo de la plataforma del pie de la presa e instalados tres medidores de nivel de agua abajo de la cresta de la presa. Fue ejecutado también, un dren de grava fina al pie del relleno y una berma de 3.0 metros de altura.

A partir de los resultados de las investigaciones, en septiembre de 1986 fue iniciado un proyecto para la estabilización de la presa y del vertedero existente, fue considerada la posibilidad de realizar elevaciones futuras. Sin embargo, antes de concluir la obra, la presa fue elevada más de 3.0 metros por necesidad del proyecto. El vertedero fue también elevado en 0,80 metros, el día 1 de octubre del mismo año utilizándose bloques con costra de concreciones. En la noche del mismo día, el agua ya pasaba por el vertedero, considerándose adecuado el comportamiento de la estructura por los operarios de la obra. Poco tiempo después, en la madrugada del día 2 de octubre, la presa estaba rota exactamente en la zona del vertedero, permaneciendo el resto del relleno intacto.

Las posibles causas del accidente y de la ruptura fueron mejor comprendidas con inspecciones realizadas en la zona después del desastre. El material natural de la ladera derecha, que era constituido por un horizonte de concreciones lateríticas con elevada permeabilidad, quedó expuesto debido a la erosión de material del relleno. En la cimentación de la cuña de ruptura, el material expuesto era constituido por una laterita arcillosa muy resistente, concluyéndose que la ruptura no se desarrolló en este material y ocurriendo solamente en el relleno.

De las hipótesis formuladas en la tentativa de explicar como el proceso de ruptura comenzó, se pueden citar:

- Erosión superficial junto al vertedor, llevando posteriormente a la erosión del relleno;
- Ocurrencia de un proceso de erosión interna regresiva (sifoneamiento) del material del relleno, que ocurrió debido a la alta permeabilidad del material de cimentación en relación a la del relleno y/o por la heterogeneidad de la permeabilidad del macizo en la zona del vertedero;
- Aumento de la presión piezométrica debido a la subida del vertedero, modificando las condiciones de equilibrio del macizo.

Las dos primeras hipótesis estarían relacionadas a la baja resistencia, a la erosión del material del relleno y la inexistencia de un sistema de drenaje interno.

Además, considerando el estado de fluidez en que los relaves se encontraban ha sido concluido que el relleno colapsado sufrió antes de la ruptura, el fenómeno de licuefacción y que estaría relacionado a condiciones como: saturación de una gran parte del macizo debido a la inexistencia de un sistema de drenaje interno, estado suelto del relave con un índice de vacíos superior al crítico debido al método constructivo y por la granulometría del material, que consistía en una arena fina limosa con poca arcilla.

Los daños causados por la ruptura alcanzaron una distancia superior a 10 kilómetros, a pesar de la pequeña declividad del cauce, la ola de lodo alcanzó cerca de 2,0 a 3,0 metros de altura. Fueron alcanzados una vía de ferrocarril y un pequeño puente de hormigón, localizados aguas abajo de la presa.

Un proyecto de estabilización de la presa fue elaborado, el cual incluyó: recuperación de la misma con la construcción de un dique aguas abajo, la recomposición de la zona damnificada, la construcción de un nuevo vertedero, bermas de equilibrio y un sistema de drenaje interno. Para el proyecto de estabilización, buscándose obtener una nueva geometría que garantizase la seguridad de la presa fueron realizados análisis de estabilidad que consideraron los factores obtenidos del monitoreo realizado: la presa estaba cimentada sobre un estrato de arcilla blanda de aproximadamente 7.0 metros de espesor, de acuerdo con los resultados de perforaciones; y el trazado de la red de flujo pudo ser realizado a partir de la determinación de la posición del nivel freático, obtenido a partir de los medidores del nivel de agua instalados en la presa. Sin embargo, los parámetros de resistencia de los materiales del relleno y de la cimentación fueron obtenidos a partir del retro-análisis y fue adoptado un factor de seguridad mínimo de 1.5 para la condición de flujo permanente, en función de los riesgos involucrados en la ruptura de la presa.

Después de definir la nueva geometría de la presa, el comportamiento de esta fue satisfactorio y en incrementos posteriores, en cuanto su altura, fueron realizados con alteración del método constructivo. El lanzamiento pasó a ser realizado en capas de 0.50 metros de espesor y compactado con el propio equipo de transporte, además de la utilización de bermas de estabilización.

Ruptura de la excavación C1 de la Empresa Minera Río Verde - Brasil (Gomes et al., 2001)

La Empresa Minera Río Verde Ltda (MRV) realiza en el municipio de Nova Lima / MG - Brasil, actividades de explotación de hierro y la consecuente disposición de relaves de este mineral. En el año 2001, la infraestructura para la disposición de los relaves era caracterizada por dos presas de contención en operación. De estas, la principal presa de contención de relaves era la llamada Excavación C1, que era una antigua zona de explotación de hierro.

La Excavación C1 está ubicada en el extremo norte de la mina, con los bordes Sur y Oeste en cotas topográficas superiores a los correspondientes al Norte y Este. La zona Este se encuentra limitada por la vía de acceso que lleva al distrito de San Sebastián de Aguas Claras circundada por la periferia de la ciudad. La excavación pasó a ser utilizada como depósito de relaves de hierro de los nuevos frentes de operación, cuando su explotación fue interrumpida en el año 1990. Esto ocurrió por restricciones impuestas por la propia geometría de la excavación, que contaba con aproximadamente 500 m. de largo, 120 m. de ancho y 100 m. de profundidad. Los relaves de granulometría fina y elevado contenido de hierro eran lanzados al extremo sur de la estructura de contención y se sedimentaban a lo largo de la misma. De acuerdo con las características de deposición comunes en este tipo de situación, la parte gruesa y más pesada de los relaves se sedimenta más rápido. En este caso, la parte fina con líquidos se direccionó para la zona del dique Norte, esto sumado a la inexistencia del sistema de drenaje interno, contribuyó claramente para la elevación del nivel freático en la presa, alcanzando niveles inaceptables.

En el segundo semestre de 1994, cuando el depósito de relaves alcanzó los límites de altura de la excavación, comenzó la segunda fase del proyecto con la implantación de diques de contención a lo largo de los bordes Norte y Este de la excavación, buscando la recomposición topográfica de la geomorfología original. Para esto, se procedió a la ejecución de diques iniciales de regularización y conformación general de

los límites Norte y Este de la excavación, a partir de este dique inicial, fueron ejecutados incrementos sucesivos por el método constructivo de aguas arriba, con la construcción de diques de 10 m. de altura y 15 m. de ancho. Se observó en los últimos, que incrementos realizados antes de la ruptura, el ancho de los diques fue visiblemente menor que el declarado. El 22 de junio de 2001 ocurrió la ruptura del borde Noreste de este sistema de contención, cuya cresta se encontraba a 25 m. arriba de la cota de la cresta del dique final de la excavación, con alturas superiores a 40 m. en relación a los bordes. En este instante, el perímetro de la estructura de contención de relaves era de aproximadamente 1130 m., con una sección transversal de 45300 m² y taludes con inclinaciones medias de aproximadamente 1V:1.8H. Vale la pena resaltar que esta inclinación del talud es muy acentuada para las condiciones geomorfológicas locales y para este tipo de estructura. La ruptura presentó dimensiones de más o menos 330 m. de ancho, a lo largo del dique de contención, lo cual liberó inmediatamente, 530000 m³ de relaves acumulados (Figura 3). Además de rupturas retrogresivas en la presa y consecuentemente de su contenido, el movimiento de masa principal causó la ruptura del suelo natural de los bordes de la excavación, alcanzando un volumen total estimado de 690000 m³.

El material deslizante alcanzó una carretera y se dirigió hacia los cauces de agua adyacentes y debido a la topografía extremadamente accidentada de la zona, este movimiento se dio rápidamente, así alcanzando una extensión de aproximadamente 6.3 km., con un ancho promedio estimado de 60 metros y un desnivel total de 400 metros. Ocurrió una depositación de los materiales movilizados en depresiones encontradas a lo largo del camino, colmatando cauces y exponiendo otras zonas a la erosión y causando nuevas inestabilidades. En esta zona fue afectada una bocatoma de agua de la compañía de abastecimiento de este servicio del estado.

Las observaciones técnicas siguientes no fueron consideradas en el proyecto de implantación de la presa de contención de relaves en la Excavación C1:

- Lanzamiento de los relaves junto a la presa hacia aguas arriba, manteniendo una lámina de agua apartada de la estructura de contención. En este caso, el lanzamiento ocurrió aguas arriba y en dirección al dique;
- Las características tecnológicas de los relaves, buscándose evaluar su capacidad de carga como cimentación a los incrementos de altura posteriores;
- Cálculo de proyecto y adopción de dispositivos de drenaje y filtración internos adecuados al caso;

- Las características tecnológicas de los materiales utilizados en los rellenos de los diques de contención, donde se debe incluir los constituyentes de los bordes de la excavación y los materiales de préstamo;
- Monitoreo de la estructura de contención y de las laderas durante su operación, identificando variaciones en el nivel freático y la ocurrencia de pequeños desplazamientos, además de otros indicios de su mal desempeño.

Monitoreo de presas de relaves

Son diversas las causas que hacen necesario el monitoreo de presas de relaves, siendo un ejemplo de esto: los problemas ambientales, las situaciones de riesgo y la necesidad de acompañamiento a largo plazo, dentro de sistemas de acciones de emergencia.

La manera de disposición de relaves en presas de minería, generalmente construidas con la técnica del relleno hidráulico, que pueden llegar a tener 60 m., con grandes áreas de acumulación de relaves, pudiendo provocar problemas ambientales graves, como polución física o físico-química de fuentes de agua, alteraciones en el paisaje y hasta pérdidas de vidas humanas.

Un mayor número de presas de relaves surgió en Brasil desde los años setenta, casi al mismo tiempo, las exigencias ambientales sobre las empresas de minería se incrementaron, debido a la preocupación



Fig. 3. Excavación C1 indicando la dirección de la ruptura, su efecto retrogresivo y la ruptura de los materiales adyacentes (Gomes et al., 2001)

Fig. 3. Excavation C1 indicating failure direction, its retrogressive effect and the failure of adjacent materials (Gomes et al., 2001)

y a la legislación ambiental, ya que en el aspecto de sustentabilidad de la actividad minera, una función muy importante es lo referente a la presa de relaves y su adecuado control.

Con gran frecuencia, los efectos de las rupturas causan impactos con distintos grados de severidad, con respecto a los aspectos económicos, ambientales, de seguridad del personal y de violación de la legislación ambiental. Una herramienta para identificar y evaluar los riesgos por orden de importancia es el FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), según Robertson y Shaw (2003), o sea el análisis de los tipos y efectos de las rupturas. Esta herramienta posibilita evaluar la responsabilidad sobre los riesgos y cuantificar los impactos de las rupturas de las presas de relaves. Para aplicar esta metodología, la cual permite evaluar una combinación de probabilidades y consecuencias de rupturas, es necesario conocer los mecanismos que llevan al colapso de las mismas y sus parámetros, además de los equipos o procesos involucrados y los efectos de tales rupturas en todo el sistema del cual hacen parte dentro de su entorno, también incluyendo la vida y la seguridad de las personas.

Robertson (2001) y Robertson y Shaw (2003) presentan una escala de clasificación fundamentada en la premisa de que el riesgo es proporcional a:

- a. Factores específicos del sitio o riesgo inherente;
- b. Aplicación de criterios intencionalmente aceptados, normas, directrices y métodos;
- c. Precedentes demostrados;
- d. Capacitación, habilidad y compromiso del equipo de proyecto, construcción y operación;
- e. Monitoreo de comportamiento imprevisto;
- f. Disponibilidad de tiempo y métodos;
- g. Riesgo operacional y de gestión.

La principal aplicación de la evaluación de riesgo son los Planes de Acción para Emergencias (PAE), según Viseu y Almeida (2000) que son exigidos en virtud del nivel de riesgo que la actividad puede causar. El PAE debe ser elaborado para cada presa, a menos que las consecuencias de la ruptura de esta sean bajas. La definición de la necesidad de preparación del PAE deberá ser tomada por medio de análisis específicos, en función de las condiciones de riesgo aguas abajo.

Son varias las causas de las situaciones de emergencia, como eventos sísmicos, inundaciones, erosión, hundimientos, saturación, grietas, fugas de agua, filtración, flujos y sumideros, además de lectura errada de los instrumentos. Estos eventos, según Menescal y Miranda (1997), pueden contribuir directamente a la ruptura de la presa, también para cada uno de los eventos potenciales deben de ser realizados monitoreos.

En Brasil, el PAE es de responsabilidad del propietario de la presa, siendo su ausencia un agravante de su responsabilidad por negligencia, en el caso de que ocurra algún daño (Milonas, 2005). Los programas reguladores varían de estado a estado, de una manera general, son responsables por la revisión y aprobación de los Planes de Acciones Emergenciales (Veesaert *et al.*, 2005).

La responsabilidad, que un sistema integre los diversos PAE's, es de las autoridades públicas y de las compañías mineras, siendo la identificación de riesgos, solamente hecha si se conocen bien los indicadores de estos, o sea los parámetros observados y los medidos o monitoreados. Por lo tanto, es fundamental la definición de geoindicadores que sean aplicables en este sistema integrado, que funcione al mismo tiempo, para las políticas públicas ambientales, de defensa civil y que sean adaptados por los datos de monitoreos de los sistemas PAE de las compañías mineras.

Geoindicadores

Para la evaluación del comportamiento geológico-geotécnico de las presas de relaves, es común la aplicación de parámetros relativos solamente referentes a la estructura de la presa. Sin embargo, debido a la diversidad de variables ambientales involucradas en los accidentes de rupturas de presas de relaves, tanto en las causas como en las consecuencias, se considera adecuada la utilización de geoindicadores para el monitoreo. Especialmente, cuando se considera que los condicionantes geológicos son los responsables por varias rupturas, ya informados en los casos históricos. Los geoindicadores son aplicables también a los elementos que generan cambios e impactos al medio físico.

Geoindicadores son definidos como medidas de alta resolución y corto plazo (<100 años) de los cambios en los procesos y fenómenos geológicos que ocurren en la superficie de la Tierra o cerca a ella, que sean significativos para el monitoreo ambiental y su respectiva evaluación. Ellos miden tanto eventos catastróficos como eventos graduales que involucran la evolución humana (Berger y Iams, 1996; Coltrinari, 1996; Campagnoli, 2002; Zuquette *et al.*, 2004). Estos geoindicadores constituyen los procesos abióticos que transcurren en los diferentes ambientes terrestres, estos ambientes pueden ser modificados por causas naturales o antrópicas.

Los geoindicadores describen procesos y parámetros ambientales que pueden cambiar sin la interferencia humana o por medio de actividades antrópicas

que pueden acelerar, retardar o desviar el curso normal de estos procesos naturales.

En presas de relaves que involucran condicionantes geológicos en sus cimentaciones y en sus laderas, podrían utilizarse geoindicadores en sus respectivos sistemas de monitoreo, tanto en un abordaje preventivo como en los estudios de impactos de accidentes de rupturas y sus consecuencias.

Hay que considerar que los registros y medidas de los distintos geoindicadores deben seguir un programa de monitoreo con una frecuencia mínima sugerida. De igual manera, los puntos de muestreo de estos geoindicadores van a depender directamente de la escala con la cual se esté trabajando y de la red de muestreo sugerida para dicha escala, como también de los sitios representativos de cada uno de los geoindicadores, o sea, donde se desarrollan los diferentes procesos físicos relacionados.

En un abordaje geológico-geotécnico algunos de estos geoindicadores son considerados relevantes para medidas de procesos del medio físico recientes en zonas tropicales (Diniz, 2000; Diniz, 2002), como: erosión de suelos y sedimentos (ton/Ha/año), deslizamientos de hombreras (m^2 / evento x lluvia acumulada mm/día); colmatación (estratigrafía del depósito (m^3 / ton/ año); actividades kársticas (m^2 / número de ocurrencias); sismicidad (intensidad MM/ número de ocurrencias); expansión y colapsividad de suelos (m^2 / número de ocurrencias). Otros geoindicadores serían aplicables en caso de monitoreo de presas de relaves, como: granulometría; frecuencia de vibraciones cercanas; compresibilidad; hundimientos, nivel freático; conductividad hidráulica del material de fundación; resistencia al cizallamiento; movimientos de masa en el relleno de la presa, precipitación máxima diaria (mm/día); licuefacción; número de infraestructuras, edificaciones existentes y número de personas que viven aguas abajo.

Estos geoindicadores pueden ser documentados usando y unificando la información geoambiental existente en los bancos de datos de catástrofes de presas de relaves, basados en los sistemas de monitoreo preventivos, como los PAE's de las empresas mineras y de Defensa Civil.

Conclusiones

El control de las situaciones de riesgos de ruptura de presas de relaves, como también la prevención para evitar pérdidas humanas y de impactos al medio ambiente causadas por estos accidentes, serán más efectivas si son consideradas medidas sistemáticas, con monitoreamiento de los parámetros geológico-

geotécnicos esenciales para el entendimiento de los mecanismos de ruptura y sus consecuencias con dirección aguas abajo. Basado en estas consideraciones y en el análisis de rupturas ocurridas en Brasil en los últimos años fueron propuestos geoindicadores como herramientas de monitoreo de presas de relaves.

Por lo tanto, en presas de relaves, que presentan condicionantes geológicos en sus cimentaciones y laderas, podrían utilizarse geoindicadores en sus sistemas de monitoreamiento integrados a los PAE's, tanto en un abordaje preventivo como en los estudios de impactos ambientales producidos por los accidentes de rupturas de presas de relaves y sus respectivas consecuencias.

Estos geoindicadores, en caso sean adoptados como padrones comunes, se pueden aplicar de manera integrada a los sistemas PAE's privados y públicos, atendiendo al mismo tiempo, las demandas de Defensa Civil, de las instituciones ambientalistas y de las compañías mineras. La identificación de los riesgos, solamente puede ser hecha desde que se conozcan bien los indicadores de riesgo, o sea los parámetros observados y medidos en el campo y/o monitoreados, para el acompañamiento y control del comportamiento estructural e hidráulico de la presa, para identificar previamente los indicios de rupturas, subsidiando así, la prevención de accidentes y evitando los diversos daños.

Referencias

- Berger, A.R. y Iams, W.J. 1996. *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems*. Balkema/ Rotterdam. Brookfield. 466 p.
- Campagnoli, F. 1998. Silting as an environmental geoindicator on metropolitan area of São Paulo - Brazil. *8th International Congress of the IAEG*. Vancouver, Canadá.
- Chandler, R.J. y Tosatti, G. 1995. The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985. *Proceedings - ICE: Geotechnical Engineering*, 113(2), pp. 67-79.
- Coltrinari, L. 1996. *Natural and anthropogenic interactions in the Brazilian tropics*. In: *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth*. Editors: Berger, A.R. y Iams, W.I. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, p. 295-310.
- Diniz, N.C. 2000. A geo-environmental data base due to elaborate geoindicators scenarios of São Paulo State based on engineering geological criteria. *31^o International Geological Congress*. Rio de Janeiro, Brazil.
- Diniz, N.C. 2002. A geo-environmental data base due to elaborate geoindicators scenarios based on engineering-geological criteria. In: *Indicators of sustainability for the mineral extraction industries*. Editors: Villas Boas, R.C. y Beinhoff, C. Rio de Janeiro: CNPq/CYTED. p. 61-78.

- Gomes, R.C., Oliveira Filho, W.L. y Ribeiro, L.F.M. 2001. *Laudo pericial da ruptura do dique de contenção de rejeitos de minério de ferro da cava C1 da Mineração Rio Verde Ltda, localizada no município de Nova Lima / M.G.* Universidade Federal de Ouro Preto. M.G., Brasil, 18p.
- Göransson, T., Benckert, A., Lindvall, M. y Ritzén, R. 2001. *Dam failure at the Aitik mine: Investigations, conclusions and measures taken.* Boliden AB, Suecia, 20/03/2005, www.boliden.se.
- ICOLD y UNEP. 2001. *Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences. Bulletin 121. Lessons learnt from practical experiences.* ICOLD, Paris, França, 144p.
- Martínez, A.G. y Gómez, D.C. 2002. Geomecánica de la ruptura de la presa de residuos de Aznalcóllar y sus consecuencias medioambientales. *Seminario Internacional de Geomecánica*, Caracas, Venezuela, 17p.
- Menescal, R.A. y Miranda, A.N. 1997. Plano de ações emergenciais para barragens. *XII Seminário Nacional de Recursos Hídricos*. Vitória, ES.
- Milonas, J.G. 2005. Análise de riscos geológico-geotécnico em barragens de rejeito: Plano de Ação Emergencial - PAE. *Seminário de Geologia de Engenharia*. Pos-graduação em Geotecnia. UnB, Universidade de Brasília, Brasília - DF.
- Morgenstern, N.R. 2001. Geotechnics and mine waste management - update. *Seminar on Safe Tailings Dam Construction - Technical Papers*, Gaellivare, Suécia, 14p.
- Parra, P.C. y Lasmar, N.T. 1987. Ruptura da barragem de rejeitos da Mina do Fernandinho. *Anais do Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração*. ABMS. Rio de Janeiro, Brasil, pp. 423-444.
- Parra, P.C. y Ramos, J.V. 1987. Ruptura, recuperação e estabilização da barragem de rejeitos da Mina do Pico São Luiz. *Anais do Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração*. ABMS. Rio de Janeiro, Brasil, pp. 445-462.
- Penman, A.D.M. 2001. *Risk analyses of tailings dam construction. Seminar on Safe Tailings Dam Construction - Technical Papers*, Gaellivare, Suécia, 17 p.
- Robertson, A.M. 2001. *Auditoria e revisão para estabilidade de longo prazo de barragens de rejeitos.*
- Robertson, A.M. y Shaw, S. 2003. Risk management for major geotechnical structures on mines. In: *Proceedings of computer applications in the mineral industries (CAMI)*; Calgary, Alberta, Canadá.
- USEPA. 1994. *Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, New York, 59 p.
- Veesaert, C., Cardia, R.J.R. y Tsuzuki, A.L.Z. 2005. Segurança de barragens - questões de responsabilidade. *XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens*. Goiania, GO.
- Viseu, T. y Almeida, A.B. 2000. Plano de emergência interno de barragens. *5º Congresso da água*. Lisboa, Portugal.
- World Information Service on Energy (WISE) 2005. *The Inez coal tailings dam failure (Kentucky, USA)*. Uranium Project, Alemanha, 12/05/2005, <http://www.wise-uranium.org/mdafin.html>. email: uranium@t-online.de.
- Zuquette, L.V., Pejon, O., Santos Collares y J.Q. 2004. Land degradation assesement base don environmental geoindicators in the Fortaleza metropolitan region, state of Ceará, Brazil. *Enviromental Geology*. 45: 408-425.

Recibido: mayo 2005

Aceptado: abril 2006