### GEOINDICADORES PARA EL MONITOREO DE PRESAS DE RELAVES

Luis Martin Tejada Cervantes & Patrícia Rojas Sánchez

Universidade de Brasília, Dept. Engenharia Civil & Ambiental/FT, Asa Norte, Brasília DF, CEP 70.910-900, Brasil Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ciencias Naturales y Formales, Av. Independencia S/N Arequipa, Perú <a href="mailto:luistejadace@gmail.com">luistejadace@gmail.com</a> pattyrsanchez@gmail.com

#### **RESUMEN**

En el Congreso Geológico Peruano del año 2006 se presentó el artículo técnico "Uso de Geoindicadores para la Prevención de Rupturas de Represas Hidroeléctricas y de Contención de Relaves de Minería con Enfoque al Impacto Ambiental Causado" donde se presentaban dos casos estudio, en donde cientos de personas perdieron su vida y un serio daño al medio ambiente fue causado; fueron analizados los casos de la ruptura la represa de relaves de la Mina de Fernandinho y de la represa hidroeléctrica St. Francis, siendo estos ejemplos de que puede pasar si la Geología Local no es comprendida e interpretada correctamente o lo que sería peor, no considerada para la proyección y manutención obras con propósitos de generación de energía o de disposición de residuos de minería.

En el mencionado trabajo son presentados geoindicadores propuestos para este tipo de casos para determinar la susceptibilidad a la ocurrencia de estos eventos en determinadas estructuras, que son compatibles con una extensa base de datos revisada. En los mencionados casos y otros en investigados, se concluyó que la causal no fue el aspecto constructivo, ya que en términos de estabilidad de la estructura y en la calidad de los materiales, eran los más adecuados, siendo la causa del colapso la localización de las represas encontrándose sobre zonas inestables asociadas a diversos factores geológicos.

En el presente trabajo se expone la base de datos de una serie de deslizamientos de presas de relaves donde hubo serio daño ambiental donde como agentes desencadenadores se exponen como los geoindicadores propuestos del presente artículo ya teniendo como principal objetivo el monitoreo a llevarse a cabo en la etapa de operación asociados con instrumentos de medida y no tanto en la prevención en la fase de diseño como fue el motivo del artículo de Tejada (2006).

### 1. INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

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 llegan 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.

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), osea 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.

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 ambienta- les, de defensa civil y que sean adaptados por los datos de monitoreos de los sistemas PAE de las compañías mineras.

#### 2. OBJETIVO

El objetivo de este artículo es la definición de geoindicadores para el monitoreo de presas de relaves en la etapa de operación de estas, basándose en una revisión histórica analítica de una serie de casos estudio, también aquí presentada como parte del objetivo.

### 3. METODOLOGÍA

Para concluir este trabajo de investigación se adoptó la siguiente metodología propuesta por Robertson (2001) y Robertson y Shaw (2003) donde 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 acepta- dos, 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.

### 4. ANÁLISIS DE CASOS ESTUDIO

En la Tabla 1 y 2 se pueden observar respectivamente los casos históricos revisados, la referencia bibliográfica y el desarrollo analítico donde se destacan los principales agentes desencadenadores de la ruptura de las mencionadas estructuras.

## Tabla 1 – Caso Histórico y Referencia Bibliográfica.

Caso Histórico Referencia bibliográfica

Mina do Fernandinho Parra, P.C. y Lasmar, N.T. 1987. Brasil (1986) Ruptura da barragem de rejeitos da

Mina do Fernandinho.

Pico São Luiz Parra, P.C. y Ramos, J.V. 1987.

Brasil (1986) Ruptura, recuperação e estabilização da barragem de rejeitos da Mina do Pico São Luiz.

Stava R. J. Chandler y G. Tosatti. 1995.

Italia (1985) The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985. Proceedings.

Omai Morgenstern, N.R. 2001.

Guiana (1995) Geotechnics and mine waste mana-gement-update.

Los Frailes Martínez, A.G. y Gomez, D.C. 2002. España (1998) Geomecánica de la ruptura de la pre-

sa de residuos de Aznalcóllar y sus consecuencias medio ambientales.

Aitik Göransson, T. et al. 2001.

Suiza (2000) Dam failure at the Aitik mine: Investigations, conclusions and measures

taken.

Baia Mare Penman, A.D.M. 2001.

Rumania (2000) Risk analyses of tailings dam cons-truction.

Inez The Inez coal tailings dam failure

USA (2000) (Kentucky, USA) http://www.wise-uranium.org/mdafin.html (2005).

Mineração Río Verde Gomes, R.C. et al. 2001.

Brasil (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.

Tabla 2 – Agentes desencadenadores.

Empresa minera	Presa / Localización	Tipo de mineral	Método constructivo	Tipo de accidente	Causas de la ruptura	Agentes desencadenadores
Cia Minera Cerro Negro	Cerro Negro, Chile	Cobre	Aguas Arriba	Ruptura general de la presa	-	-
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
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
Remin S.A.	Borsa Mare, Rumania	Zinc	-	Ruptura general de la presa	-	Lluvia intensa
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"
Boliden Ltd., Canada	Los Frailes, Aznalcóllar, España	Zinc, Cobre y Plata	-	Ruptura de la cimentación de la presa	Resistencia del material de cimentación	-
BHP Copper	Pinto Valley, Arizona, USA	Cobre	-	Ruptura del talud aguas abajo de la presa	-	-
-	Sgurigrad, Bulgaria	Zinc, Cobre y Plata	Aguas Arriba	Ruptura general de la presa	Licuefacción de los relaves	Lluvia intensa
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"
	Cia Minera Cerro Negro  Minera Río Verde Ltda  Boliden Ltda  Remin S.A.  Aurul S.A.  Boliden Ltd., Canada  BHP Copper	minera Localización  Cia Minera Cerro Negro, Chile  Minera Rio Verde Ltda Minas Gerais, Brasil  Boliden Ltda Aitik mine, Gällivare, Suecia  Remin S.A. Borsa Mare, Rumania  Aurul S.A. Baia Mare, Rumania  Boliden Ltd., Canada Aznalcóllar, España  BHP Copper Pinto Valley, Arizona, USA  Cambior Inc., Canada; Golden Star Resources Inc., Omai, Guinea Canada; Resources Inc.,	minera       Localización       lipo de mineral         Cia Minera Cerro Negro Cerro Negro Negro Negro Negro Negro Poble       Cobre         Minera Rio Verde Ltda       Minas Gerais, Brasil       Hierro         Boliden Ltda       Aitik mine, Găllivare, Suecia       Cobre         Remin S.A.       Borsa Mare, Rumania       Zinc         Aurul S.A.       Baia Mare, Rumania       Oro         Boliden Ltd., Canada       Los Frailes, Aznalcóllar, España       Zinc, Cobre y Plata         BHP Copper       Pinto Valley, Arizona, USA       Cobre         -       Sgurigrad, Bulgaria       Zinc, Cobre y Plata         Cambior Inc., Canada; Golden Star Resources Inc., Golden Star Resources Inc.,       Omai, Guinea       Oro	Cia Minera Cerro Negro, Chile Cobre Aguas Arriba  Minera Rio Verde Ltda Minas Gerais, Brasil Hierro Aguas Arriba  Boliden Ltda Aitik mine, Gällivare, Suecia  Remin S.A. Borsa Mare, Rumania Oro Inicio Aguas Arriba  Boliden Ltd., Canada Aznaloóliar, España  BHP Copper Pinto Valley, Arizona, USA  Cambior Inc., Canada: Golden Star Resources Inc.,  Canado: Canado Comai, Guinea Oro  Cambior Inc., Canada: Golden Star Resources Inc.,	Cambior Inc., Canada:  Canada:	minera Localización ripo de mineral constructivo accidente de la ruptura  Cia Minera Cerro Negro Chile Cobre Aguas Arriba Ruptura general de la presa  Minera Rio Verde Ltda Brasil Hierro Aguas Arriba Ruptura general de la presa  Boliden Ltda Atitik mine, Gallivare, Suecia Cobre Rumania Presa  Remin S.A. Borsa Mare, Rumania Cobre Rumania Ruptura general de la presa  Aurul S.A. Baia Mare, Rumania Coro Inicio Aguas Arriba Ruptura general de la presa  Boliden Ltd., Canada Aznalcóllar, España Zinc, Cobre y Plata Ruptura de la cimentación de la presa  BHP Copper Pinto Valley, Arizona, USA Bulgaria y Plata Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Omai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Omai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa  Cambior Inc., Comai, Guinea Coro - Ruptura general de la presa

# 5. MONITOREO DE PRESAS EN OPERACIÓN

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 & Shaw (2003), osea 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 estos tipos de represas. 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, además de los equipos o procesos involucrados y los efectos de tales rupturas incluyendo la vida y la seguridad de las personas.

## 6. GEOINDICADORES EN LA ETAPA DE OPERACIÓN

Geoindicadores son definidos como medidas de alta resolución y corto plazo (<100 años) de los cambios de 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 & Iams, 1996; Coltrinari, 1996; Campagnoli, 1998; Zuquette et al., 2004).

Los factores geológicos influyen en cimentaciones y en las laderas, podrían utilizarse geoindicadores en sus respectivo monitoreo, con un abordaje preventivo y como en estudios de impactos de accidentes y sus consecuencias.

Los geoindicadores deben seguir un programa de monitoreo con una frecuencia mínima. Los puntos de muestreo de los geoindicadores dependen de la escala con la que se trabaje y de la red de muestreo de la escala, como los sitios representativos de cada uno de los geoindicadores, donde se desarrollan los diferentes procesos físicos relacionados.

Son varias las causas de las situaciones de emergencia, como eventos sísmicos donde el monitoreo debe estar asociado a un plan de emergencias de defensa civil y de evacuación más de parada de producción con factores de seguridad y probabilidades de ruptura fuera del estándar, inundaciones con sistemas de drenaje de contingencia, erosión asociado con planes de control con monitoreo topográfico de pérdida del suelo, hundimientos controlados con prismas, saturación (filtración, flujos y sumideros) asociados a niveles de piezómetros/inclinómetros, grietas monitoreadas con extensómetros, fugas de agua con control del borde libre la presa más del volumen máximo admisible, además de lectura errada de los instrumentos por personal no entrenado.

#### 7. CONCLUSIONES

Para evitar pérdidas humanas y de impactos ambientales causadas por estos, deben ser consideradas medidas sistemáticas, con monitoreo de parámetros geológicos esenciales para el entendimiento de los mecanismos de ruptura y sus consecuencias aguas abajo en la etapa de diseño de ingeniería y operación. Basado en una revisión de rupturas de presas en operación y en sus análisis de estas fueron propuestos geoindicadores y sus herramientas de monitoreo de presas, adoptándose como padrones comunes sin que se dejen de utilizar sistemas de Planes de Acción de Emergencias Públicos, de Defensa Civil, de instituciones ambientalistas y de las compañías mineras.

## 8. REFERÉNCIAS

Berger, A. & Iams. W. 1996. Geoindicators assenssing environmental changes in earth systems. Brook. 466p.

Campagnoli, F. 1998. Silting as an environmental geoindicator on metropolitan area of São Paulo – Brazil. International Association of Engineering Geology – IAEG. Vancouver, Canadá.

Coltrinari, L. 1996. Natural and anthropogenic interactions in the brazilian tropics. In: Geoindicators: assessing rapid environmental changes in erath. Ed: Berger, A.R. & Iams, W.I. A.A. Balkema, Rotterdam, pp.295-310.

Diniz, N. 2002. A geoenvironmental elaborate geoindicators scenarios based on geological criteria. In: Indicators of sustenaibability: for the mineral industries. Ed: Villas & Beinhoff, C. Rio de Janeiro. pp 61-78.

Diniz, N., Beirigo, E., Matheus, I., Ribeiro, L. & Tejada, L. 2006. Casos históricos de ruptura de presas de relaves en Brasil: . Boletín Geológico y Minero, España, 117 (2): 265-275.

ICOLD. 2001. Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences. Bulletin 121., Paris, França, 144p.

Parra, P.C. & Lasmar, N.T. 1987. Ruptura da barragem de rejeitos da Mina do Fernandinho. Anais do Simpósio sobre Barragens e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração. Rio de Janeiro, Brasil., pp. 423-444.

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. & Shaw, S. 2003. Risk management for major geotechnical structures on mines. In: Proceedings of computer applications in the mineral industries (CAMI); Calgary, Alberta, Canadá.

Robertson, A.M. 2001. Auditoria e revisão para estabilidade de longo prazo de barragens de rejeitos.

Tejada, L. 2006. Uso de Geoindicadores para la Prevención de Rupturas de Represas Hidroeléctricas y De Contención de Relaves de Minería con Enfoque al Impacto Ambiental Causado. XIII Congreso Geológico Peruano. Lima-Perú. 1-4p.

Tejada-Cervantes L.M. 2005. Ruptura da barragem St. Francis, Universidade de Brasilia, Brasil. 21 p.

USEPA. 1994. Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, New York, 59 p.

Viseu, T. y Almeida, A.B. 2000. Plano de emergência interno de barragens. 5° Congresso da àgua. Lisboa, Portugal.