

Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros

LUCIANO OLDECOP (*) y ROBERTO RODRÍGUEZ (**)

RESUMEN Los resultados obtenidos del análisis de 251 casos de falla y accidentes en presas de residuos mineros, recopilados en el Boletín 121 del ICOLD, muestran que estas se producen tanto en las que están en operación como en las inactivas o abandonadas. Las principales causas de falla son: 1) deslizamiento del talud, 2) terremoto, 3) sobrepaso, 4) problemas de fundación, 5) tubificación, 6) falla por problemas en las estructuras auxiliares, 7) erosión del dique, 8) subsidencias o colapso del terreno. Las mayores causas de falla de presas activas son deslizamiento del talud, terremoto y sobrepaso. En el caso de las presas inactivas son sobrepaso, terremoto y deslizamiento. Las presas más afectadas son las que se construyen por el método de aguas arriba. El principal problema que favorece el proceso de falla es la existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros almacenados en las presas. Las consecuencias de estas fallas son grandes pérdidas económicas, degradación y contaminación del medio ambiente y en muchos casos pérdidas de vidas humanas.

MECHANISMS OF FAILURE OF THE TAILINGS DAMS

ABSTRACT *The obtained results of the analysis of 251 cases of failure and incident of tailing dams, compiled in the ICOLD bulletin 121, show that they take place in active and inactive dams. The leading causes of failure are: 1) slope instability, 2) earthquake, 3) overtopping, 4) foundation, 5) seepage, 6) structural, 7) erosion and 8) subsidence. The leading causes of failure of active dams are slope instability, earthquake and overtopping. For inactive dams, the leading causes of failure are earthquake, overtopping and slope instability. Most of the failures are associated with dam built using the upstream method. The main factor that favours the failure process is the existence of a high degree of saturation in metallurgical wastes stored in dams. The consequences of these failures have been high economical losses, environmental degradation and pollution and in many cases human deaths.*

Palabras clave: Mecanismos de falla, Presas de residuos minero-metalúrgicos, Medio ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

El vertido de residuos mineros al medio ambiente por rotura de una presa de residuos mineros tiene frecuentemente consecuencias ambientales catastróficas. Esto se debe fundamentalmente a que la fracción sólida posee una elevada superficie específica (superficie por unidad de peso). Esta propiedad determina, en primer lugar, que la mezcla sólidos-agua (lodo) se comporte como un fluido viscoso, permitiendo que el volumen vertido se esparza sobre grandes superficies. Esto hace que, ocurrida la rotura de la presa, una gran masa de residuos, frecuentemente con sulfuros, se ponga en contacto con el oxígeno de la atmósfera. El ácido producido provoca la disminución del pH del medio, con lo que se favorece la disolución de los metales contenidos en los residuos. Esos pueden entonces movilizarse e incorporarse al suelo, a las aguas superficiales o subte-

rráneas, contaminándolos de tal forma que su recuperación resulte inviable.

Es por ello que la prevención de las fallas de presas de residuos mineros tiene un enorme interés desde el punto de vista de la protección del medio ambiente, además de evitar otras consecuencias adversas que tienen estos incidentes (muertes, pérdidas económicas, pérdida de puestos de trabajo, etc.). El objetivo de este trabajo es mostrar los diferentes mecanismos de falla que afectan a las presas de residuos mineros y las principales causas que lo provocan sobre la base de casos reales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la realización de este trabajo se emplea la información disponible en la literatura científica, bases de datos y diferentes informes técnicos, los cuales se citan a lo largo del texto. Entre la información consultada para la realización del mismo se encuentran los Boletines del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 121). La colección de casos de fallas de Davies et al., (2001). La bases de datos en el sitio de Internet WISE www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm / uranium projet, INGEMMET y UNEP.

(*) Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
Correo: oldecop@unsj.edu.ar

(**) Facultad de Ciencias. Universidad de Girona. España.
Correo: roberto.rodriguez@udg.es

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

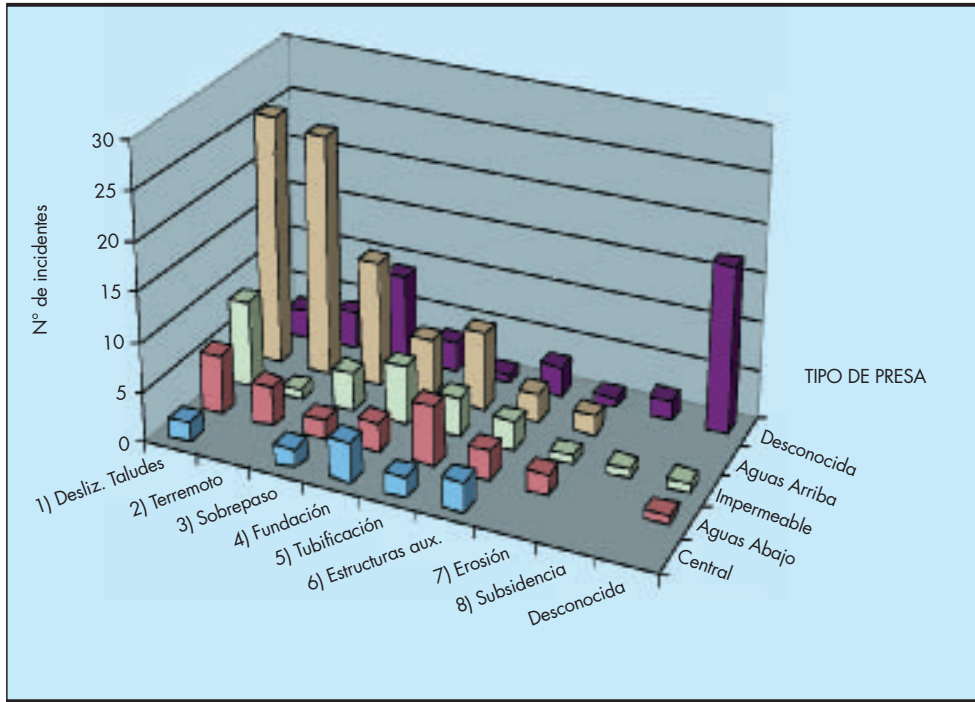


FIGURA 1. Número de incidentes versus principales mecanismos de fallas de los diferentes tipos de presas de residuos mineros de acuerdo al sistema de cierre utilizado.

3. IDENTIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE FALLA DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

El estudio de casos históricos permite identificar cuáles son los posibles mecanismos de falla que pueden afectar a una presa de residuos mineros. De acuerdo al análisis de la información disponible se puede ver en la figura 1, que los principales mecanismos que causan las fallas de las presas de residuos mineros son ocho: 1) deslizamiento del talud, 2) terremoto, 3) sobrepasso, 4) problemas de fundación, 5) tubificación, 6) falla por problemas en las estructuras auxiliares, 7) erosión del dique, 8) subsidencias o colapso del terreno. Estas se han enumerado en orden decreciente del número de casos de presas que han fallado por los mencionados mecanismo de falla y de las que se tiene conocimiento a nivel mundial en función de la literatura científica.

Estos mecanismos de falla no son los únicos, pueden existir otros. Lo cierto es que de acuerdo a la información analizada son los más comunes. Normalmente se suelen presentar combinaciones de ellos, aunque también pueden ocurrir solos.

En la mayoría de los casos existe una propiedad de los materiales que es común para todos, la existencia de un grado de saturación elevado de los materiales, un elevado nivel freático en el interior de las presas y en muchos casos la

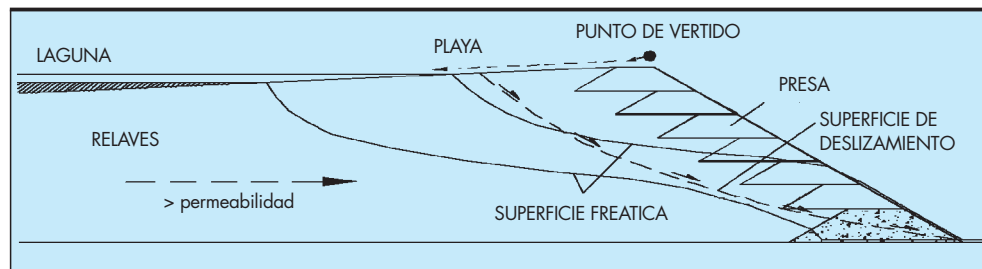
existencia de abundante agua debido a precipitaciones. La presencia de abundante agua favorece el desarrollo de las causas 1, 2, 3, 5, 7, 8.

En los apartados siguientes analizaremos cada uno de los diferentes mecanismos de fallas identificados en la figura 1. El análisis se realizara considerando los diferentes aspectos identificados en la literatura consultada y los casos históricos mejor documentados.

4. DESLIZAMIENTO

De acuerdo al análisis de 251 casos de accidentes de presas de residuos mineros ocurridos en todo el mundo, se identifica el deslizamiento del talud de la presa o de toda la presa sobre su fundación, como la causa más frecuente de rotura. El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material. Los eventos que determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza. En particular, para las presas de residuos mineros, tres situaciones típicas son las que comúnmente desencadenan un deslizamiento de talud: 1) Elevación de la superficie freática y su aproximación al talud, 2) Desarrollo de presiones de poro durante trabajos de recrecimiento

FIGURA 2. Inestabilidad del talud de una presa de residuos por aproximación del nivel freático, debido a la elevación del nivel de agua en la laguna de decantación.



MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

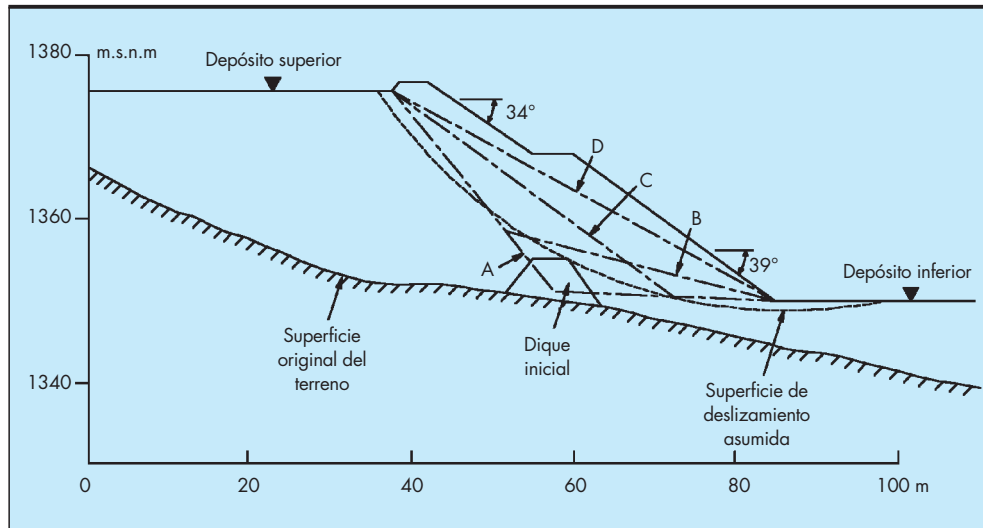


FIGURA 3. Sección de la presa de colas de Stava (dique superior), fallada en 1985. Hipótesis de posición de la superficie freática: A, B, C y D para el análisis de estabilidad (Chandler y Tosatti, 1995).

(ritmo de recrecimiento excesivo que no permite la disipación de presiones de poro), durante la instalación de la cobertura o por tránsito de maquinaria pesada, 3) Licuación de las zonas saturadas del depósito debido a una acción sísmica. Situaciones peligrosas también pueden generarse por una operación deficiente u otros factores, como por ejemplo, el congelamiento de las capas superficiales que impide el drenaje y provoca el aumento de las presiones de poro.

La posición de la superficie freática juega un papel fundamental como factor desencadenante de muchos deslizamientos de taludes. La aproximación de la superficie freática al talud puede ocurrir por: 1) elevación del nivel de agua en la laguna de decantación debido a aportes de agua de crecidas o lluvias persistentes o por obstrucción de tuberías de evacuación, 2) por infiltración de agua de lluvia 3) por operación inadecuada de la presa (mal manejo del vertido), provocando que la laguna de decantación se aproxime a la presa, 4) presencia de mantos de material fino que provoquen la ocurrencia de niveles freáticos colgados. En casos extremos el nivel freático puede aflorar por la superficie del talud.

Chandler y Tosatti(1995) analizaron la estabilidad del talud de la presa superior de Stava, fallada en 1985. El análisis se realizó para cuatro posiciones hipotéticas de la superficie freática (A, B, C y D), que se muestran en la figura 3. Los factores de seguridad que se obtienen para la superficie de deslizamiento mostrada son: 1.35, 1.21, 1.04 y 0.76 considerando cada una de las superficies A, B, C y D respectivamente. Sabiendo que esta presa no tenía disposiciones específicas para facilitar el drenaje, es fácil pensar que el mecanismo de falla más probable haya sido la aproximación de la superficie freática al talud.

En la mayoría de las presas de residuos mineros, el manejo del agua dentro del depósito es un factor determinante del nivel de seguridad con que se opera. La técnica más habitual para el control del agua freática es hacer que la permeabilidad de los residuos mineros aumente desde el centro del depósito hacia los bordes (Figura 2). El vertido de los residuos mineros se hace en distintos puntos a lo largo del perímetro del depósito, de manera que se forme una playa de baja pendiente por la que los residuos mineros recién vertidos fluyen hacia el centro, donde se ubica la laguna de decantación. El escurrimiento de los residuos mineros sobre la playa provoca una clasificación espontánea de las partículas

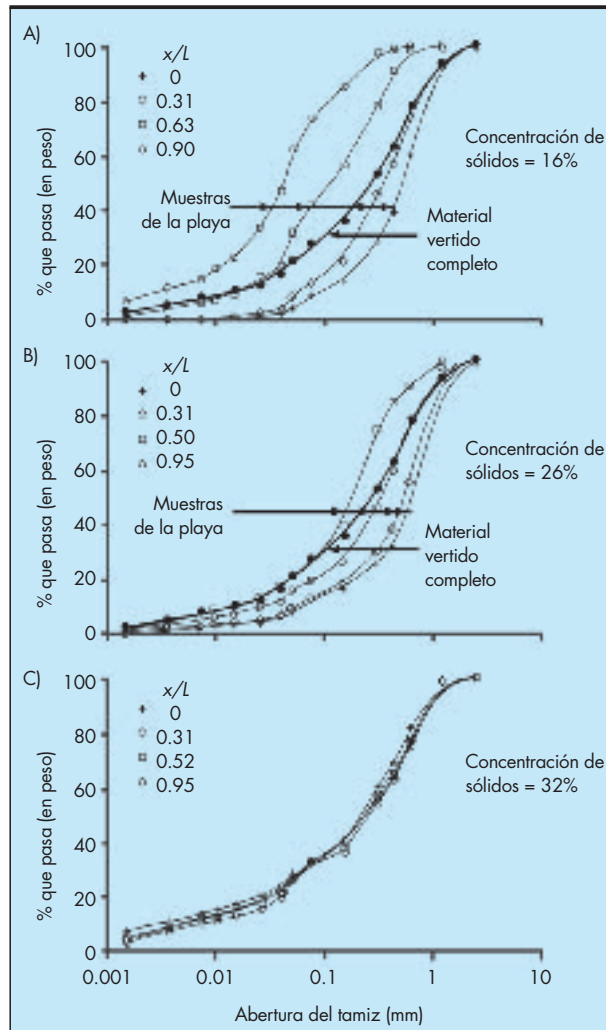


FIGURA 4. Efecto de la concentración de sólidos en la "efectividad" de la clasificación por tamaños en una playa de colas. Datos obtenidos en ensayos en canal (Blight, 1994). a) Concentración de sólidos (peso seco/peso total) = 16%, b) 26% y c) 38%. x/L = puntos en donde se tomaron las muestras (x/L = 0 es el punto de vertido).

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

por tamaño. Las fracciones más gruesas se depositan cerca del punto de vertido, en tanto que los finos se transportan hacia zonas más distantes de la presa. La fracción más fina sedimenta bajo agua en la laguna de decantación. La efectividad de esta técnica para controlar la permeabilidad del depósito depende fundamentalmente de la relación sólido líquido con que se vierten los residuos mineros.

Ensayos en canal realizados por Blight (1994) sugieren que, a medida que aumenta la concentración de sólidos del material vertido (residuos mineros más espesos), la efectividad del mecanismo de clasificación disminuye. Se observa en la figura 4, que para una concentración de sólidos del 16% (peso de sólidos secos/peso total del material) la clasificación es muy efectiva, resultando en curvas granulométricas bien diferenciadas de las muestras tomadas en distintos puntos de la playa. Con una concentración del 26%, la efectividad disminuye bastante y con una concentración del 32% el mecanismo se inhibe por completo. Esto significa que para un mismo material y granulometría, la variación de la relación sólido/agua puede tener profundos efectos en la distribución de permeabilidades y por lo tanto en la posición de la superficie freática. Blight (1994) señaló que otros factores pueden, en menor medida, influir en la geometría de la playa y en la efectividad del mecanismo de clasificación, tales como el caudal de residuos mineros vertidos y el hecho de que éstas fluyan por una superficie seca o húmeda.

Otra técnica utilizada para el control de la granulometría es la de los hidrociclones, que separan el caudal de residuos mineros en una fracción gruesa y otra fina. La primera (arena) se utiliza para el recrecimiento de la presa, en tanto que la fina se deposita en la parte central del depósito. En la actualidad el diseño de depósitos de residuos mineros tiende cada vez más a incorporar sistemas de drenaje que permiten ejercer un control más directo sobre el agua freática.

En un número importante de casos de deslizamiento se sabe que el accidente estuvo precedido por un periodo de llu-

vias intensas. Debido a la granulometría muy fina de los residuos mineros, el volumen de agua almacenado de forma capilar (a presión menor que la atmosférica) puede ser muy importante. Este volumen reduce considerablemente la capacidad de almacenamiento de agua en los poros del material y como resultado de esto, la infiltración de cantidades relativamente pequeñas de agua de lluvia puede provocar una rápida elevación del nivel freático y la saturación de los residuos con el correspondiente descenso de la estabilidad del talud.

Es evidentemente que la pendiente con que se diseña y construye el talud es uno de los factores primordiales para asegurar su estabilidad. Algunos casos históricos de deslizamiento ocurrieron en taludes construidos con pendientes evidentemente excesivas. Por ejemplo en el caso de Stava (Italia) en 1985 el talud deslizado tenía una pendiente 1:1.2 (39°) (Chandler y Tosatti, 1995) y en el de Fernandinho (Brasil) con pendiente 1:1.1 (42°) (ICOLD, 2001). Se observa que en algunos casos la pendiente del talud coincide con el ángulo de reposo del material, es decir el talud es el que resulta naturalmente del volcado del material con que se construye la presa. Es obvio decir que al margen de seguridad de estos taludes es inexistente.

5. TERREMOTOS

El terremoto de Northridge (California, 1994) provocó la falla de la presa de Tapo Canyon, de 24 metros de altura, utilizada para el almacenamiento de residuos finos provenientes del lavado de áridos. La falla implicó el flujo de una gran cantidad de residuos a lo largo de 180 metros aguas abajo (Harder y Steward, 1996). Afortunadamente, por estar ubicada en una zona despoblada, no provocó víctimas ni otras pérdidas económicas importantes. El depósito se había iniciado en la depresión de una antigua cantera. Para facilitar el drenaje durante su explotación se había abierto un canal en la roca que desaguaba en un arroyo vecino (Figura 5),



FIGURA 5. Vista aérea de la presa de Tapo Canyon previa a su rotura (Foto de Northridge Collection, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley).

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

que se cerró con material rechazado de la explotación. Luego la presa continuó recreciéndose hacia aguas arriba con el mismo material. Al momento de la falla, la presa llevaba dos años inactiva, ya que se había detenido su recrecimiento y el vertido de residuos. Sin embargo, en la mitad este se realizaba el lavado de los camiones mezcladores de hormigón, por lo que en la mitad oeste del depósito existía una laguna en contacto directo con la presa.

Se estima que el terremoto provocó una aceleración máxima entre 0.3 y 0.4g en el sitio de emplazamiento de la presa. El movimiento indujo la licuación del material de la presa, que se encontraba saturado debido a la proximidad de la laguna, y también de los residuos almacenados. Esto produjo una brecha de unos 60 metros de ancho por la que escaparon los residuos mineros licuados. Es probable que la falla se haya iniciado en la zona del antiguo canal de desagüe, con la licuación del material de tapón y que ello haya provocado la falla en cadena de resto de la presa y la licuación de los residuos.

El fenómeno de licuación de materiales granulares (no plásticos) se puede entender fácilmente si se comprende primero la tendencia de estos materiales a reducir su volumen de poros cuando se los somete a deformaciones de corte cíclicas. Esta tendencia se ilustra en la Figura 6. Cuando un material granular tiene sus poros llenos de agua (condición saturada), estos cambios de volumen deben ocurrir a expensas de expulsar agua en los poros. Esta transferencia de agua puede tomar más o menos tiempo dependiendo de la permeabilidad del material. Si la permeabilidad es baja, la distancia a las fronteras drenantes es grande o las acciones (cargas o deformaciones) ocurren rápidamente, ocurrirá un incremento de la presión del agua. Este aumento de la presión del agua intersticial tiene el efecto de disminuir la resistencia al deslizamiento entre partículas, hasta el punto de hacer que el material fluya como un líquido viscoso, de alta densidad.

6. DESLIZAMIENTO SOBRE LA FUNDACIÓN

El deslizamiento de la presa de Aznalcollar (España, 1998) fue provocado por una serie de problemas en la fundación de la presa. La presa es de tipo anular, con recrecimiento hacia aguas abajo y una pantalla impermeable de arcilla en su cara de aguas arriba (Figura 7a). Todo el depósito estaba apoyado sobre una delgada capa aluvial (de aproximadamente 4 metros de espesor) y ésta sobre un depósito de arcillas marinas carbonatadas del terciario, con un espesor mayor a 60 metros. Las propiedades mecánicas de estas arcillas son muy particulares. Ensayadas al corte directo, presentan un comportamiento extremadamente frágil, con una rigidez inicial elevada y un pico de resistencia muy agudo y una caída de resistencia abrupta. Por otra parte, la permeabilidad de la arcilla es extremadamente baja, entre 2 y 7×10^{-9} cm/s (Alonso y Gens, 2006).

Una sección de 600 metros de longitud del costado SE se deslizó una distancia de 60 metros en dirección al cauce del río Agrio, sin que se detectaran señales previas que permitieran prever el accidente. Por la brecha producida se escaparon 7 millones de metros cúbicos de residuos mineros fuertemente ácidos, que contaminaron los valles de los ríos Agrio y Guadamar. El deslizamiento fue eminentemente de traslación, en el que la presa se movió prácticamente como bloque rígido. La superficie de deslizamiento, plana con una ligera inclinación (2°) en la dirección del movimiento, se desarrolló en las arcillas frágiles de la fundación, a 13 metros por debajo de la superficie natural del terreno (Figura 7).

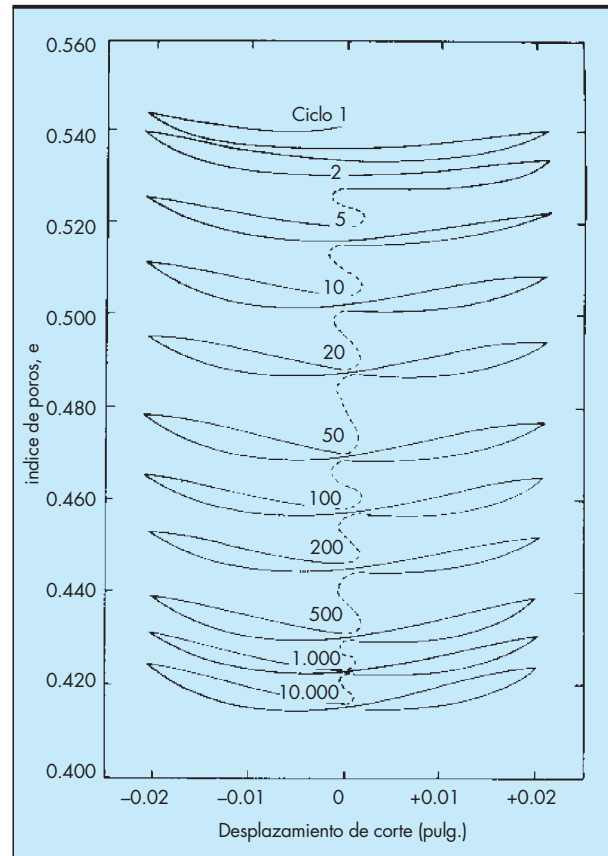


FIGURA 6. Ensayo de corte directo drenado con aplicación de una deformación de corte cíclica (Youd, 1972).

Aguas abajo se desarrolló una importante cuña de empuje pasivo que llegó a invadir el cauce del río Agrio.

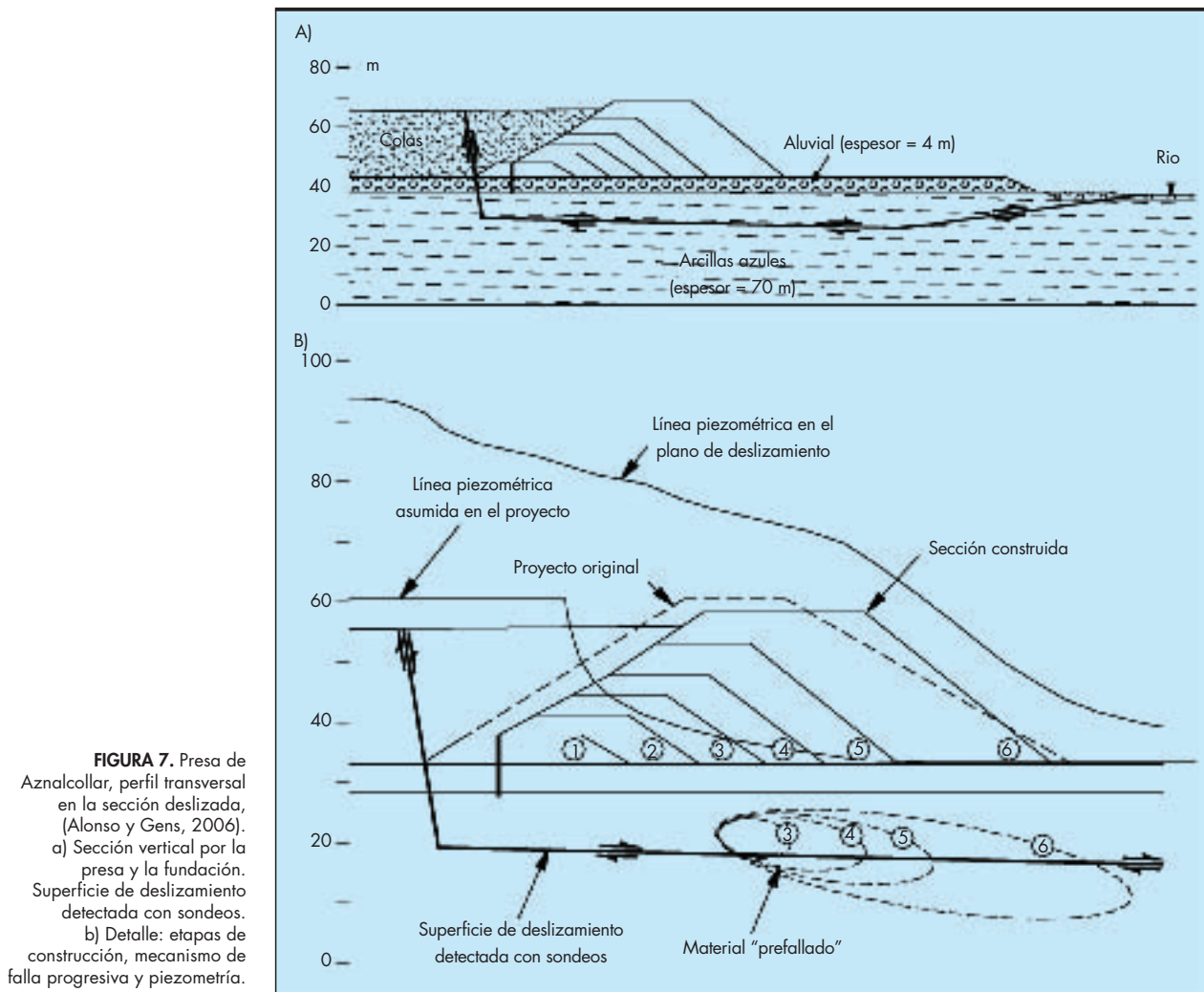
Se identificaron varios factores que contribuyeron a la falla (Alonso y Gens, 2006; Olalla y Cuellar, 2001). Todos ellos provienen las características particulares de la fundación.

La presencia de planos de estratificación determinaron la dirección y el mecanismo de deslizamiento. Estas discontinuidades eran tan sutiles que sólo se pudieron detectar a partir de la exposición de bloques de arcilla al aire y su secado.

La fragilidad de la arcilla probablemente favoreció el desarrollo de un mecanismo de falla progresiva al ritmo del recrecimiento de la presa. Al respecto existe un factor negativo adicional. La pendiente constructiva del talud de aguas abajo de la presa (que probablemente coincidió con el ángulo de reposo del material del material de escollera utilizado) fue significativamente mayor que la prevista en el proyecto. Si bien, en este caso, esto no determinó la falla del talud, la elevada pendiente contribuyó a generar mayores tensiones de corte en la fundación, bajo el pie de aguas abajo de la presa (Figura 7b).

Por último, la baja permeabilidad y homogeneidad del depósito de arcillas retrasó la disipación de las presiones de poros generadas por la construcción de la presa y el llenado del depósito. De hecho la presa se diseñó considerando las presiones intersticiales resultantes de un análisis de flujo en condición estacionaria. Ésta es una práctica habitual en el proyecto de presas, ya que se supone que constituye una hipótesis de diseño conservadora. La medición de presiones in-

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS



tersticiales en la arcilla luego de ocurrida la falla (Alonso y Gens, 2006) demostró que las presiones eran mucho mayores que las previstas y que dicha condición estacionaria estaba muy lejos de ser alcanzada (Figura 7b).

7. SOBREPASO, TUBIFICACIÓN Y EROSIÓN

A lo largo del proceso de construcción y llenado, la morfología y estructura de un depósito de residuos mineros cambia en el tiempo. La forma de operación de la presa puede tener una influencia importante en el riesgo de sobrepaso, tubificación o erosión.

Una operación inadecuada en el vertido de los residuos puede hacer que la altura de resguardo disminuya a niveles peligrosos. La obstrucción de tuberías de desagüe es otro problema que puede llevar al sobrepaso. El hecho de que, por razones de protección del medio ambiente, el agua almacenada y también la que ingresa accidentalmente en la presa no se pueda verter al medio, condiciona fuertemente el diseño y la operación. Si el depósito es de tipo anular, el único aporte de agua que puede recibir es el de las precipitaciones, pluviales o nievales, que caigan en el área que ocupa su planta. Si, en cambio, el depósito está ubicado en un valle, con una presa de cierre por el costado de aguas abajo,

entonces las previsiones hidrológicas deberán tener en cuenta el área de captación de la cuenca y el volumen de agua que puede generar una lluvia o deshielo. En algunas presas de este tipo se construyen estructuras de desvío (canales o tuberías) para evitar que el agua de escurrimiento superficial ingrese en el depósito.

Un ejemplo interesante de falla por sobrepaso es el de la presa de Merriespruit (Sudáfrica), ocurrida en 1994 (Fourie y Papageorgiou 2001). La presa era de tipo anular con planta rectangular y tenía al momento de su rotura 31 metros de altura. El recrecimiento se hacía hacia aguas arriba, utilizando los mismos residuos mineros como material de construcción y permitiendo su secado para favorecer su consolidación por acción de las fuerzas capilares. Casi un año antes de ocurrir la falla, el llenado del depósito fue suspendido por haber presentado problemas de estabilidad. Sin embargo, de forma esporádica, ocurrieron escapes de residuos mineros y agua, desde un depósito vecino que continuaba en operación. A consecuencia de esto la laguna de decantación fue empujada gradualmente hacia el borde que luego fallaría. No se conoce la altura de resguardo al momento de la falla, pero se estima que era escasa. La falla se inició luego de una tormenta de lluvia de 50 litros/m², se supone que por sobrepaso del coronamiento

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

(Fourie et al, 2001). La brecha dejó escapar 600000 m³ de residuos mineros que fluyeron a lo largo de 3 Km, provocando 17 muertos.

El mecanismo de falla de la presa de Merriespruit se explica en la figura 8a. El agua vertiendo por el coronamiento erosionó la cara exterior del talud iniciando una brecha de erosión regresiva. Es posible que pequeños deslizamientos locales aceleraran el proceso de erosión (Blight, 1994). El vertido continuado de agua erosionó también el material de estos deslizamientos acumulado al pie del talud. Al desaparecer la estructura de soporte exterior, los residuos mineros más finos y con elevado contenido de agua, del centro del depósito, comenzaron a ser sometidos a tensiones de corte crecientes. Fourie y Papageorgiou (2001) realizaron ensayos no drenados de los residuos mineros almacenados en la Presa de Merriespruit, encontrando que para las densidades y niveles de confinamiento que existían en la presa, su comportamiento es de tipo contractivo y por lo tanto potencialmente licuable. En un determinado punto del proceso, la resistencia de pico no drenada de los residuos mineros fue superada y a partir de ese momento un mecanismo de falla progresiva contribuyó a acelerar la rotura. El resultado fue lo que se conoce como "licuación estática" de los residuos mineros. La inestabilidad iniciada en una porción limitada de material, se extendió a una gran masa que fluyó a través de la brecha en forma de líquido viscoso.

Los procesos de tubificación provocan mecanismos de falla similares al descrito en el párrafo anterior. Se inician por afloramiento de agua freática en un talud o por lavado de partículas hacia el exterior o hacia otros materiales más gruesos. La pérdida de material genera un proceso de erosión retrógrada, que va ampliando la vía de agua y por lo tanto el caudal y la capacidad de provocar más erosión (Figura 8b). El proceso acaba por desestabilizar el talud de la presa, provocando la aparición de chimeneas o deslizamientos y en definitiva la aparición de una brecha. El aumento de las tensiones de corte sobre los residuos mineros provoca su licuación estática y el flujo a través de la brecha. Un proceso similar se produce en el caso de fallas por erosión. La crecida de un curso de agua vecino, el agua descargada por el vertedero, un canal que corre paralelo al pie del talud o el almacenamiento de agua contra el pie del talud pueden producir su erosión hasta que se elimina el material de la presa, provocando la rotura, la licuación de los residuos mineros y su vertido.

8. FALLA DE ESTRUCTURAS AUXILIARES

De acuerdo a la colección de casos históricos recogida en el Boletín 121 del ICOLD (2001), la mayor cantidad de incidentes originados en las estructuras auxiliares se deben a fallas en los sistemas de decantación del agua sobrenadante del depósito. Es común que estos sistemas estén formados

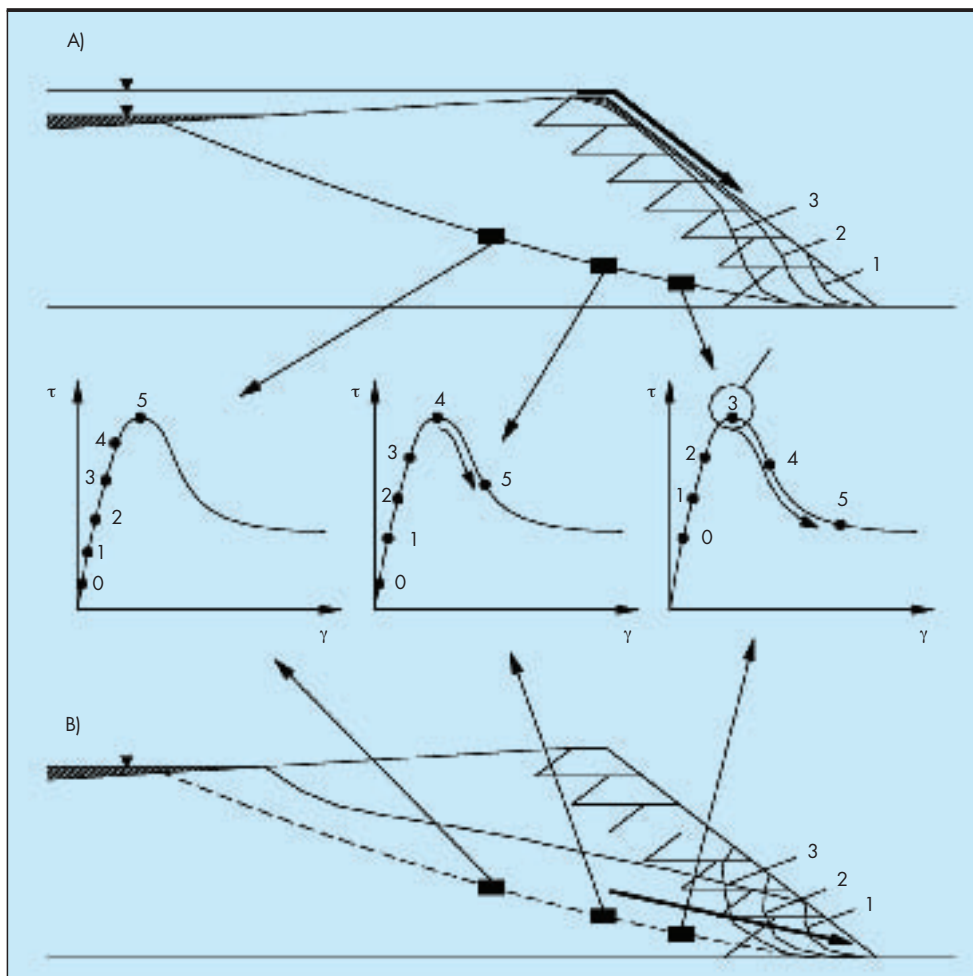


FIGURA 8. a) Mecanismo de falla de una presa por sobrepaso, provocando la erosión del talud y la licuación estática de los relaves. b) Mecanismo de falla de una presa por tubificación.

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

por una o más chimeneas o torres de decantación en las que el nivel de rebalse se va elevando gradualmente a medida que el depósito crece en altura. Una tubería que corre por el fondo del depósito lleva el agua desde la base de la chimenea hacia el exterior. Es bastante frecuente la falla de estos conductos, lo que deriva en filtraciones de agua desde la tubería hacia los residuos mineros con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento y elevación del nivel freático; o bien la creación de una vía de escape para los residuos mineros de poca consistencia. Otros incidentes dentro de esta categoría se deben a rotura de tuberías de descarga de residuos mineros hacia el depósito, con el consiguiente vertido y peligro de erosión de la presa; falla de vertederos o de sistemas de by-pass para crecidas por haber sido diseñados con una capacidad inadecuada y problemas con tuberías de drenaje.

Como ejemplo interesante de falla iniciada por un problema en una tubería de decantación, se puede citar el del complejo de dos presas de residuos mineros de Stava (Italia), cuyo colapso ocurrió en 1985. Chandler y Tosatti (1995) propusieron como factor más probable de inicio de la falla, la fuga de agua del conducto de decantación del depósito superior. A un cierto punto de la construcción de la presa, este conducto se obstruyó. Para solucionar el inconveniente se construyó un by-pass (Figura 9). Esto se hizo mediante un tubo de acero horizontal que se acopló al extremo libre del conducto de decantación. Excavando los residuos mineros hasta descubrir un tramo de conducto más allá de la obstrucción, se construyó una chimenea que conectaba el otro extremo del tubo de acero con el conducto de decantación. El tubo de acero estaba directamente apoyado sobre la superficie de los residuos mineros recientemente vertidos. Luego, cuando el depósito continuó creciendo, el tubo quedó inmerso en la masa de residuos mineros, que son bastante compresibles. Bajo el peso de las nuevas capas, el tubo pudo haber sido arrastrado hacia abajo y en un cierto momento su extremo arrancado de la chimenea. Esto permitió que el agua transportada por el tubo escapara directamente a los residuos mineros, haciendo que la superficie freática en ese

sitio se elevara. En la figura 3 se mostraba, de acuerdo a los análisis de estabilidad realizados por Chandler y Tosatti (1995), cuán sensible era el talud de esta presa a una elevación de la superficie freática.

9. SUBSIDENCIA

Los casos de falla de presas de colas por subsidencia no son frecuentes. En la colección de Boletín 121 del ICOLD (2001) sólo se registran tres casos de un total de 221. Todos ellos están asociados a la actividad minera subterránea que, por proximidad o por condiciones geológicas favorables, en un cierto momento llegan a afectar a los depósitos de colas en superficie. En dos de los casos registrados, Mulfilira (Zambia) y Atlas (Filipinas), la falla consistió en el escape de colas licuadas hacia galerías subterráneas en donde se estaban realizando actividades de extracción.

En cambio, el caso de la presa de Iwiny (Polonia) parece ser una auténtica falla por subsidencia de la fundación (ICOLD, 2001). La falla ocurrió en 1967 y la información publicada es escasa. La presa estaba construida a través de un valle. Las actividades de extracción se hacían de forma subterránea. Una de las galerías había avanzado, aproximándose a la presa desde aguas arriba, por debajo de la posición del depósito de colas. Al momento de la falla el extremo de la galería estaba a 200 metros del eje de la presa. Una zona de falla, de unos 20 metros de espesor, cruzaba la presa cerca de su estribo izquierdo. Al parecer las actividades de excavación subterránea y las filtraciones desde la superficie hacia la galería, incrementadas por el bombeo de agua para mantenerla en seco, provocaron que el material de la fundación de la presa fuera arrastrado hacia la zona de falla. Esto provocó la subsidencia de la fundación de la presa y la aparición de una brecha en la misma, que provocó el vertido de 4.6 millones de metros cúbicos de colas y la muerte de 18 personas. La figura 10a muestra la disposición en planta de la presa, de la galería en cuestión y la zona de falla. La figura 10b muestra un perfil vertical coincidente con el eje de la presa.

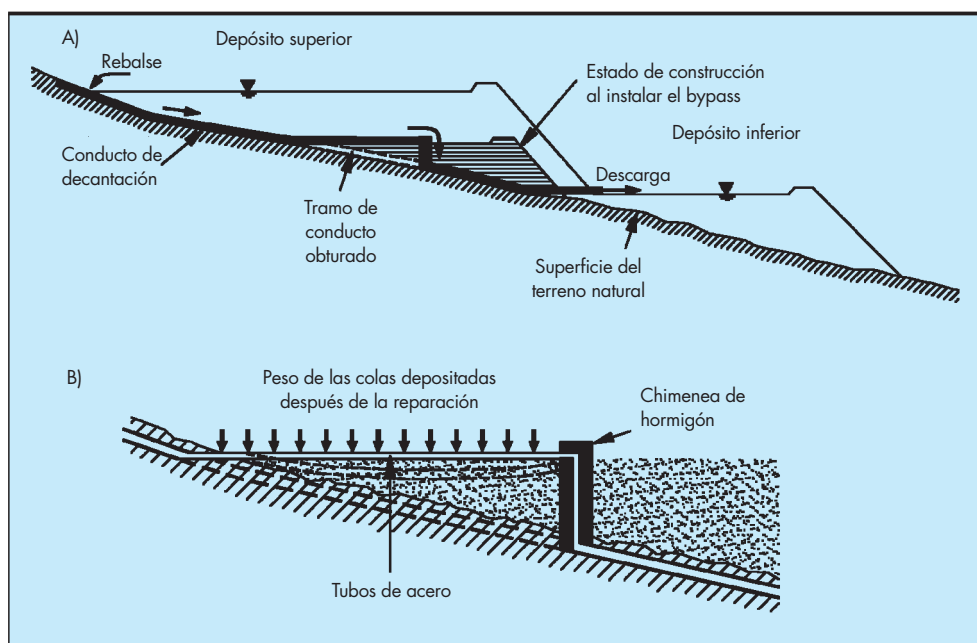
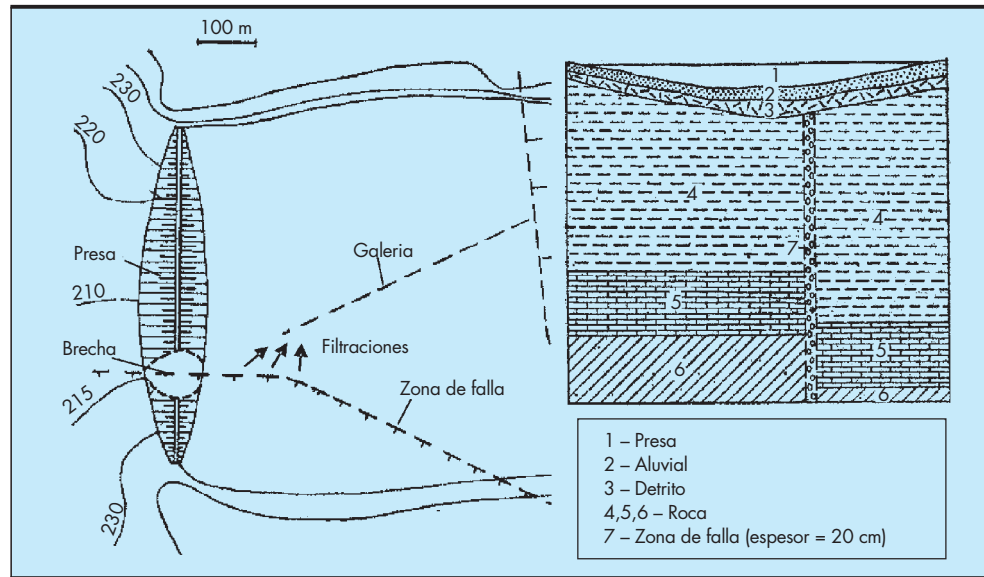


FIGURA 9. Complejo de Stava (Chandler y Tosatti, 1995). a) Esquema de la reparación realizada para salvar un tramo de conducto de decantación obstruido en la presa superior (fuera de escala). b) Detalle.

MECANISMOS DE FALLAS DE LAS PRESAS DE RESIDUOS MINEROS

FIGURA 10. Falla de la presa de Iwiny (Polonia, 1967). a) Planta mostrando la disposición de la presa, el reservorio de colas, las galerías subterráneas de la explotación minera, la traza de la zona falla que atraviesa el reservorio y la fundación de la presa. b) Corte vertical por el eje de la presa y su fundación. (IMGW, <http://www.otkz.pol.pl/>).



10. COMENTARIOS FINALES

Es importante destacar que la licuación estática de los residuos mineros y su escape del depósito, no ocurre necesariamente en todos los casos de deslizamiento. Cuando se presenta la licuación estática, la masa de residuos escapados de la presa se comporta como un verdadero líquido viscoso, pudiendo deslizarse varios kilómetros, aún cuando la pendiente del terreno sea de unos pocos grados. En su recorrido pueden esparcirse por grandes áreas de terreno, contaminando el suelo y las aguas subterráneas. Las velocidades observadas en algunos de estos aludes de lodo alcanzan los 40 km/h y las pendientes de equilibrio una vez detenido el movimiento oscilan entre 2 y 4° (Blight, 2003). Sin embargo, en otros casos de deslizamiento, los materiales de relave han mostrado comportamiento notablemente diferente, con una resistencia apreciable, que ha impedido su escape de la presa rota. Blight (1997) muestra un caso en donde ambos comportamientos ocurrieron en la misma presa de residuos mineros (Bafokeng, Sudáfrica), con un año de diferencia.

No existe aún una explicación satisfactoria para este comportamiento cambiante. Es posible que, debido a la naturaleza angulosa de las partículas, el comportamiento mecánico de los residuos mineros sea muy sensible a variaciones del índice de poros. Dentro de un mismo depósito estas variaciones pueden ocurrir por ejemplo por la secuencia de puntos de vertido, por efecto de la retracción por secado, o por cambios en la posición de la laguna. De hecho, varios autores que han llevado a cabo mediciones de propiedades índice y resistencia a penetración en depósitos de residuos mineros (Wagener, 1998; Wells et al, 2000; Fourie et al, 2001) destacan la gran variabilidad de las propiedades dentro de un mismo depósito.

11. REFERENCIAS

Alonso E.E. y A. Gens (2006). Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. *Geotechnique* **56**, No. 3, 185–201.

Blight, G. E. (1994). The master profile for hydraulic fill tailing beaches. *Proc. Instn. Civ. Engng*, **107**, 27-40.

Blight, G. E. (1997). Destructive mudflows as a consequence of tailing dyke failures. *Proc. Instn. Civ. Engng*, **125**, 9-18.

Blight, G. E. y A. B. Fourie (2003) A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. *Int. Workshop On Occurrence And Mechanisms Of Flow In Natural Slopes And Earthfills*, Sorrento, Italia.

Chandler, R. J. y G. Tosatti (1995). The Stava dams failure, Italy, July, 1985. *Proc. Instn. Civ. Engng*, **113**, 67-79.

Fourie, A. B. y G. Papageorgiou. (2001). Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings. *Can. Geotech. J.*, **38**, 695–706.

Fourie, A.B., G.E. Blight y G. Papageorgiou (2001). Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Can. Geotech. J.*, **38**, 707–719.

Harder, L.F. y Stewart, J.P. (1996). Failure of Tapo Canyon Tailings Dam. *J. of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, **10**, 3, 109-114.

ICOLD (2001). *Bulletin 121: Tailing dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences*. Paris.

Moya, J. (2001). Determinación de la geometría de la superficie de rotura en deslizamientos instantáneos: el caso de la balsa minera de Aznalcóllar. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Madrid, 27-30 Noviembre de 2001, vol. III, 1341-1352.

Olalla, C. y Cuellar, V. (2001). Failure mechanism of the Aznalcóllar Dam, Seville, Spain. *Geotechnique*, **51**, 5, 399-406.

Wagener, F., Craig, H.J., Blight, G.E., McPhail, G., Williams, A.A.B., and Strydom, J.H. (1998). The Merriespruit tailings dam failure — a review. *In Proceedings of the Conference on Tailings and Mine Waste '98*, Colorado State University, Fort Collins, January 1998, pp. 925–952.

Wells, C., U. Barnekow, M. Haase, M. Exner y A. T. Jakubick (2000). "A Case Study on selfweight Consolidation of Uranium Tailings", Paper presented at Uranium 2000; Conference held September 9-15, 2000, Saskatoon, Saskatchewan.

Youd, T. L. (1972). Compaction of sands by repeated shear straining. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, **98**, SM7, 709-725.