



Industrial Data

ISSN: 1560-9146

ISSN: 1810-9993

industrialdata@unmsm.edu.pe

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Perú

Mendoza Maldonado, Fernando

Variación de la resistencia cortante del material de relave por causas meteorológicas
y su influencia en la estabilidad física de la presa de relaves N.º 3 Mahr Túnel

Industrial Data, vol. 22, núm. 1, 2019, -Julio, pp. 39-49

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Lima, Perú

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81661270003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Variación de la resistencia cortante del material de relave por causas meteorológicas y su influencia en la estabilidad física de la presa de relaves N.º 3 Mahr Túnel

FERNANDO MENDOZA MALDONADO ¹

RECIBIDO: 18/10/2018 ACEPTADO: 04/02/2019

RESUMEN

Los agentes meteorológicos pueden producir alteraciones en la composición física y química del material almacenado en una presa de relaves, pues modifican sus propiedades y sus condiciones de estabilidad física. En esta investigación se evaluó el comportamiento de la resistencia cortante del relave por causas meteorológicas y su influencia en la estabilidad física de la presa N.º 3 Mahr Túnel. Además, se ejecutaron ensayos triaxiales tipo CU en muestras inalteradas extraídas de la presa para diferentes períodos de exposición. Los resultados indican que la resistencia cortante incrementa cuando aumenta el periodo de exposición meteorológica, lo que a su vez aumenta los factores de seguridad del análisis de estabilidad de la presa.

Palabras-claves: Presas de relave; resistencia cortante; agentes meteorológicos; ensayo triaxial CU; estabilidad física.

INTRODUCCIÓN

Considerando la importancia de la industria minera peruana (producida por el potencial de reservas de minerales y la existencia de importantes proyectos mineros), es posible percibir la disposición del sector privado responsable y del país por comprometerse a desarrollar y promover una actividad minera moderna, social y ambientalmente responsable. Así, en el Perú, se han construido y operado presas de relave de gran altura y recrecimientos secuenciales a fin de contribuir con el desarrollo sostenible y generar progresos en la nación. Lo anterior exige mayores requerimientos técnicos, con el propósito de garantizar la estabilidad física de las presas, particularmente ante procesos meteorológicos que pueden relacionarse con el periodo de disposición a largo plazo, pues esto da como resultado, por ejemplo, una alta saturación de las presas, generando presiones intersticiales, factor crítico que provoca fallas en los taludes de las presas.

Los investigadores Rico, Benito, Salgueiro, et al. (2007) indican que si bien es de suponerse que las presas de relaves deben durar para siempre, la experiencia muestra que los desbordamientos representan amenazas ambientales latentes, especialmente en la etapa posterior al cierre de minas. Por otro lado, Actis (2000) señala que las propiedades físicas de los relaves pueden ser determinadas a través de ensayos de laboratorio, de fricción y/o cohesión, y por ensayos triaxiales drenados, no drenados, lentos, rápidos, consolidados y de corte directo, tomando en cuenta las condiciones de operación de la presa.

La presa de relaves N.º 3 de la concesión de beneficio Mahr Túnel está ubicada en el distrito y provincia de Yauli, departamento de Junín, Perú, a una altitud promedio de 4000 m s. n. m y con un clima frío debido a la altitud. El área está afectada en su mayor parte por un tiempo lluvioso, con máximas precipitaciones entre noviembre y abril, asimismo persisten las nevadas y granizos. La precipitación máxima anual en época húmeda es 1188 mm y en periodo seco (de mayo a noviembre), 576 mm. Además, la temperatura máxima alcanza alrededor de los 17 °C, disminuye hasta -13 °C en julio y desciende hasta cerca de 0 °C

¹ Bachiller en Ingeniería Civil, con estudios de maestría en Geotecnia, por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Es consultor y supervisor de obras civiles y proyectos mineros relacionados con la ingeniería geotécnica en el Ministerio de Energía y Minas. Lima, Perú. E-mail: fmendoza@minem.gob.pe

entre septiembre y diciembre. La temperatura media es de 5.7 °C, conforme a la información obtenida en la estación meteorológica de Pachachaca, a 4000 m s. n. m.

Es necesario mencionar que la presa N.º 3 ha estado expuesta a los agentes meteorológicos, los cuales han producido cambios periódicos de temperatura, congelación del agua y modificaciones en la mineralogía del relave. De la misma forma, estos fenómenos han ocasionado alteraciones en la composición física y química de la presa, causando una variación de las propiedades del relave y, en consecuencia, de su estabilidad física.

Lo anterior ha sido examinado por diversos investigadores, como Ormazábal (2008), quien realizó un estudio sobre la evaluación de la influencia del tiempo (envejecimiento) en el comportamiento estático y dinámico de la arena de relave extraída del tranque Ovejería (ubicado en La Rinconada de Ovejería, a 550 m s. n. m) en la región Metropolitana, provincia de Chacabuco, Chile.

Sobre la influencia de las causas meteorológicas, Joshi, Achari, Kaniraj y Wijiweera (1995) realizaron una investigación, a través de experimentos de laboratorio, para estudiar y registrar los efectos de envejecimiento en la arena, además de revisar la influencia de los tipos de arena y del fluido presente en los poros del suelo. Del mismo modo, Richefeu, El Youssoufi y Radjai (2006) examinaron las propiedades de resistencia al corte de materiales granulares húmedos en un estado pendular (donde la fase líquida es discontinua) como una función del contenido de agua. La arena y los envases de vidrio se humedecieron y se probaron en una célula de corte directo y bajo varias presiones de confinamiento.

1. Justificación de la investigación

Esta investigación busca determinar con más certeza las condiciones de estabilidad física de la mencionada presa. Por ello, se han examinado los parámetros geotécnicos del material de relleno de la misma, teniendo en cuenta su variación en el tiempo por la influencia de los agentes meteorológicos. Así, de acuerdo a los factores de seguridad (FS) obtenidos en el análisis de la estabilidad física, ha sido posible conocer las condiciones de seguridad y protección ambiental que se deben aplicar al espacio.

2. Problema general y específico

2.1. Problema general

¿Cómo evaluar el comportamiento de la resistencia cortante del material de relleno de la presa conformada por relave grueso, modificado por causas

meteorológicas y temporales, y su influencia en la estabilidad de taludes de la presa de relaves N.º 3?

2.2. Problema específico

De acuerdo al marco de investigaciones geotécnicas, ¿qué tipo de muestreo y ensayos de mecánica de suelos son adecuados para estimar la variación de los parámetros de resistencia cortante del material de relleno de la presa conformada por relave grueso, la cual se modifica por causas meteorológicas, y cuál es la influencia de esto último en la estabilidad física de la presa de relaves N.º 3?

3. Objetivo de la investigación

3.1. Objetivo general

Evaluuar el comportamiento de la resistencia cortante del material de relleno conformado por relave grueso, teniendo en cuenta las causas meteorológicas y los posibles efectos en la estabilidad física de la presa de relaves N.º 3.

3.2. Objetivo específico

Determinar la variación de la resistencia cortante del material de relleno conformada por relave grueso. Evaluar dicha alteración a partir de ensayos triaxiales obtenidos de muestras inalteradas, los cuales son representativos ante los agentes meteorológicos, y establecer su influencia en la estabilidad física de la presa de relaves N.º 3.

METODOLOGÍA

1. Recopilación y análisis de la información existente

Consistió en la recopilación y análisis de información respecto a las condiciones de sitio, diseños de ingeniería, reportes de construcción y operación del depósito de relaves N.º 3, las cuales fueron proporcionadas por Volcan Compañía Minera S. A. A. Además, se consiguió información relacionada a las autorizaciones del depósito en el Ministerio de Energía y Minas del Perú.

2. Investigaciones de campo y ensayo de laboratorio

2.1. Investigaciones geotécnicas

Se ejecutó un programa de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio, además se utilizó la información de los estudios previos indicados. Para obtener muestras inalteradas del material de relave, se ejecutaron sondeos con calicatas convenientemente ubicadas y distribuidas en la presa de relaves N.º 3. Luego de la descripción detallada del

material, se tomaron muestras inalteradas, las cuales fueron identificadas y protegidas para ser enviadas al laboratorio de mecánica de suelos.

2.2. Investigaciones geotécnicas de campo

Para obtener muestras de relave sujetas a las condiciones reales de disposición ante los agentes meteorológicos, se analizaron muestras inalteradas de la presa y se ejecutaron tres calicatas ubicadas y distribuidas en la presa de relaves. Con el fin de conseguir muestras inalteradas de relave, conforme a la profundidad registrada en la calicata, se tomó en cuenta que el material de relave esté completamente fresco y que no haya perdido humedad. Luego, se preparó la superficie marcando el contorno de lo que fue la cara superior de la muestra. Las Figuras 1 y 2 ilustran la obtención de muestras inalteradas.

De manera complementaria, se utilizó la información respecto a los sondeos geotécnicos desarrollados en la etapa de construcción y operación del depósito de relaves.

3. Ensayos de laboratorio

A fin de evidenciar las condiciones reales del material de relave, se ejecutó el ensayo triaxial tipo consolidado no drenado (CU) con medición de presión de poros desarrollada en la muestra. De esta forma, esos ensayos pueden compensar los efectos de perturbación por la obtención de muestras inalteradas. Por otro lado, se consideró la disponibilidad de los reportes de los ensayos triaxiales con características similares del tipo de muestra y la presión de confinamiento. Los prototipos seleccionados se comprimieron con valores de esfuerzo de confinamiento (σ_c) de 1,0, 2,0 y 4,0 kg/cm^2 . Los ensayos se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Asimismo, se ejecutaron ensayos estándar (propiedades físicas) para identificar y clasificar el material de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El ensayo triaxial consistió en preparar probetas de suelo envueltas con una membrana que sirve para drenar y tener el control de la presión intersticial al interior de la muestra, por lo que se colocan piedras porosas en



Figura 1. Corte y revestimiento con parafina de muestra.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Empaque y transporte de muestra de relave inalterado $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$.

Fuente: Elaboración propia.

la base y en la parte superior (González de Vallejo, Ferrer, Ortúñoz y Oteo, 2002).

3.1. Trabajos de gabinete

- Estimación de la antigüedad de los sondeos de muestras inalteradas, existentes y recientes a partir de la información topográfica, y sondeos geotécnicos desarrollados en los diversos estudios de diseño de crecimiento de la presa de relaves N.º 3, desde 2007 hasta 2016.
- Elaboración de planos de distribución de los sondeos y proyección de los períodos de exposición a los agentes meteorológicos.
- Análisis, interpretación y discusión de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio triaxiales (CU) y de los ensayos estándar de las diferentes muestras, según el periodo de exposición a los agentes meteorológicos.
- Estimación de los parámetros físicos y de resistencia cortante del relave grueso a partir de los reportes de laboratorio.
- Determinación del modelo geotécnico a partir de los diferentes parámetros de los

materiales y de la geometría definida para los períodos de almacenamiento.

- Análisis de estabilidad física de la presa de relaves según el modelo geotécnico definido para la etapa inicial y para los diferentes períodos de exposición meteorología.

RESULTADOS

Considerando los objetivos de esta investigación, se realizaron estudios geotécnicos de las muestras inalteradas del relave con el fin de determinar su comportamiento ante los agentes meteorológicos en el tiempo. A continuación se detallan los resultados.

1. Estimación de los períodos de disposición de relave

La Figura 3 presenta la estimación de antigüedad de muestras inalteradas obtenidas del sondeo de tres calicatas. El gráfico fue elaborado a partir de la información topográfica de los crecimientos de la presa y periodo de disposición de relaves.

2. Granulometría de los relaves

Según los sondeos ejecutados de caracterización física y SUCS, el material de relave grueso es arena limosa (SM) y arena limosa con arcilla (SM-SC).

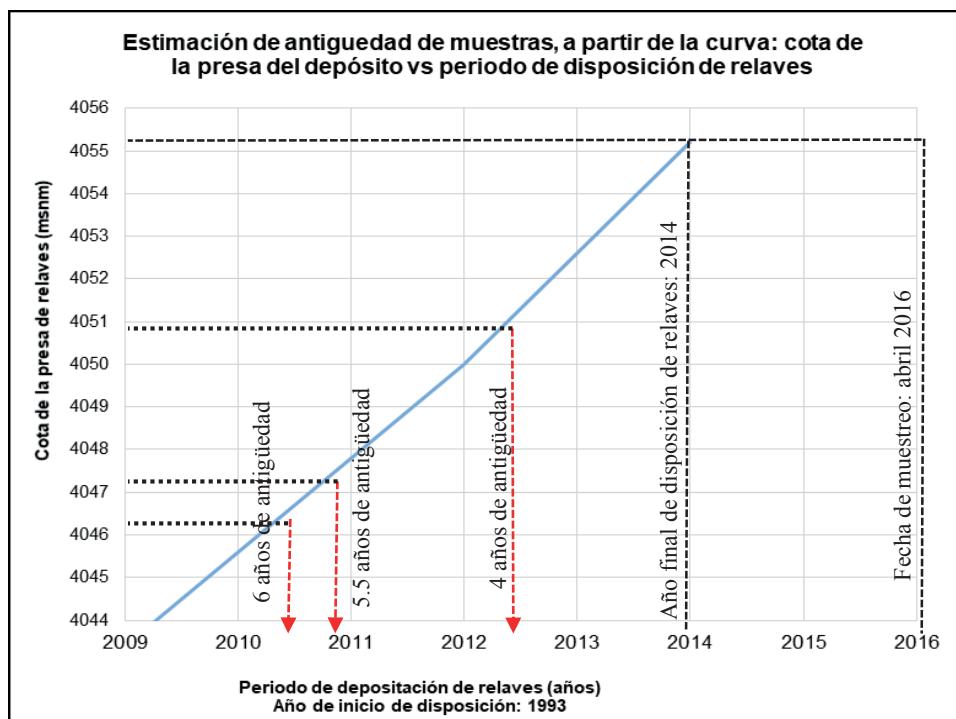


Figura 3. Estimación de antigüedad de muestras a partir de la curva: cota de la presa del depósito versus periodo de disposición de relaves.

Fuente: Elaboración propia.

El contenido de las arenas (malla #+200) está comprendido entre 57% y 83%, mientras que el contenido de finos (malla #-200) varía entre 16% y 42%.

3. Variación de los parámetros de resistencia cortante con el periodo de exposición a los agentes meteorológicos

Los resultados de los ensayos triaxiales, en términos de esfuerzos totales, indican que cuando aumenta el tiempo de meteorización (disposición) "se incrementa" la resistencia al esfuerzo cortante no drenado. Esto significa que el tiempo de disposición ante los procesos meteorológicos influye en el incremento de la cohesión y ángulo de fricción del relave.

La Figura 4 muestra la comparación de los resultados del ángulo de fricción. Así, el ejemplar BH4-SMR3 presenta un periodo de disposición estimado en 3 años, alcanzando un incremento de 60% respecto del año inicial de disposición "cero". Le sigue una tendencia creciente hasta el año 6 de disposición. En la muestra C-2 M-1 se observa un aumento de hasta 200%. En el caso de la muestra BH5-SMR3, para el año 7, se observa un descenso de hasta 68% respecto del año cero.

La Figura 5 muestra la comparación de los resultados de la cohesión. Para el año cero, en la muestra SPT CM-11 se observa que la cohesión es de 0 kg

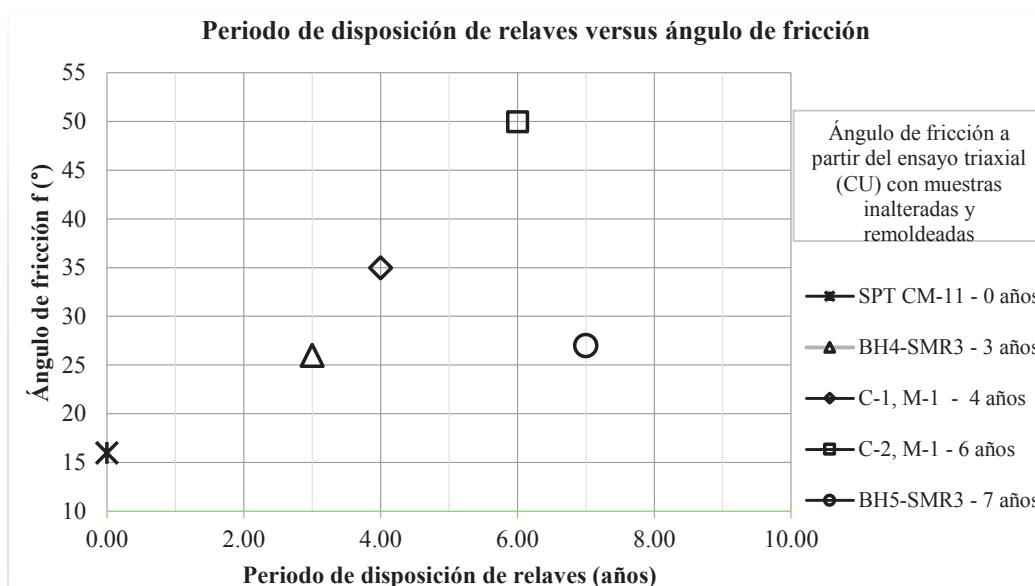


Figura 4. Variación del ángulo de fricción de relave grueso en términos de esfuerzos totales.

Fuente: Elaboración propia.

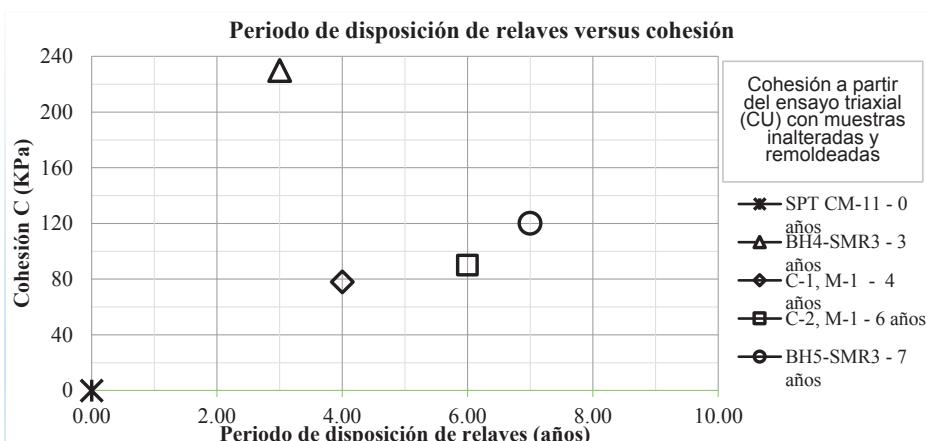


Figura 5. Variación de la cohesión del relave grueso en términos de esfuerzos totales.

Fuente: Elaboración propia.

cm²; mientras que en la muestra BH4-SMR3, con 3 años de disposición, hay un incremento súbito que alcanza una cohesión de 230 kg/cm². Sin embargo, para el año 4, en la muestra C-1 M-1 se aprecia un descenso hasta alcanzar un valor de cohesión de 78 kg/cm². Para los siguientes años ocurre un incremento progresivo de la cohesión.

4. Análisis de estabilidad física

4.1. Generalidades

Para el análisis de la estabilidad de taludes de la presa de relaves N.º 3 se tomó en cuenta lo siguiente:

- Se desarrolló la sección transversal de análisis en base a la configuración geométrica actual de la presa y de las perforaciones diamantinas, con lo cual se estimó la distribución de los materiales.
- La sección geométrica representa las condiciones críticas de la presa, es decir, el mayor el ángulo del talud, la carga por acción del sismo, las condiciones de nivel freático, entre otras.
- Se utilizó la metodología de equilibrio límite para evaluar la resistencia al deslizamiento de un talud, tomando en cuenta ciertas hipótesis respecto al mecanismo de falla, la condición de equilibrio, la superficie del nivel freático, los parámetros de resistencia cortante del material, etc.

4.2. Metodología del análisis realizado

- Se ha utilizado el software SLIDE (Rocscience versión 6) para modelar la configuración geométrica del talud interactivamente y definir los diferentes materiales, tomando en cuenta sus propiedades geotécnicas (físicas y mecánicas).
- Para determinar los factores de seguridad (FS), se partió de lo planteado por Quispe (2015), quien menciona que la definición "se lleva a cabo de manera bidimensional usando el concepto de equilibrio límite, aproximando el problema a un estado de deformación plana" (p. 4). Este autor, además, precisa que la superficie de falla crítica es aquella que proporciona el menor FS y que se encuentra de forma interactiva modificando las condiciones de búsqueda de la misma, así como evaluando las superficies de falla circular.
- A su vez, como hipótesis del análisis de la estabilidad "se considera que las propiedades

[físicas y mecánicas] de los materiales que conforman las estructuras analizadas son homogéneas e isotrópicas y que el colapso se produciría como resultado de fallas simultáneas a lo largo de la superficie de deslizamiento" (Quispe, 2015, pp. 4-5). El análisis de estabilidad pseudo-estático (PE) somete una masa deslizable de dos dimensiones a una aceleración horizontal igual al coeficiente sísmico multiplicado por la aceleración de la gravedad.

- El método usado para los análisis PE es el indicado por Hynes-Griffin y Franklin (1984), el cual requiere la reducción de las propiedades de la resistencia cortante del material hasta un 20% para aquellos materiales sujetos a un incremento de la presión de poros en condiciones cíclicas (terremotos).

4.3. Factor sísmico de diseño

El parámetro de diseño especificado para la zona de estudio es una aceleración máxima de 0,3 g, valor que tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años de exposición sísmica y correspondiente a un evento de 475 de periodo de retorno. El valor recomendado para un coeficiente adecuado PE varía entre 1/2 a 1/3 veces del valor de la aceleración pico de terreno. En el estudio de Rennat y Miller (1997) se utilizó un coeficiente sísmico de 0,15 g, valor que es ½ de la aceleración máxima esperada de 0,3 g.

4.4. Nivel freático

Los niveles freáticos registran profundidades de 16,20 m y 14,60 m a partir de la superficie de nivelación. Estos niveles de agua actúan como un nivel piezométrico, pues afectan principalmente al suelo de cimentación y al basamento rocoso, lo cual constituye una hipótesis conservadora, ya que el nivel de agua no es continuo. En efecto, Rodríguez y Oldecop (2011) mencionan que el agua infiltrada en la presa de relaves satura rápidamente los poros y parcialmente los llena con agua capilar. Además, la aproximación del agua freática al talud exterior de la presa tiene efectos desestabilizantes.

5. Parámetros geotécnicos

En la Tabla 1 se muestran las propiedades geotécnicas de los diferentes materiales utilizados en el análisis de la estabilidad. Estos parámetros de resistencia cortante se obtuvieron a partir de los ensayos triaxiales CU con muestras inalteradas y alteradas.

Tabla 1. Resumen de propiedades geotécnicas de materiales.

Material	Año de disposición	γ_{sec} (kN/m)	γ_{sat} (kN/m ³)	Totales		Efectivos	
				C (kPa)	Φ (°)	C (kPa)	Φ (°)
Relave grueso remoldeado (C11, M-1)	0	16	17,5	0	16	30	31,5
Relave grueso (BH4-SMR3-04)	3	21	24	230	26	0	41
Relave grueso (C-1,M-1)	4	19	21	78	35	50	35
Relave grueso (C-2,M-1)	6	18.5	20	90	51	120	52
Relave grueso (BH5-SMR3-04)	7	17	24	120	27	29	36,4
Relave fino (*)	-	16,5	20,0	0	25	-	-
Cimentación	-	19	20	100	36	10	36

γ_{tot} : peso específico total del suelo; γ_{Sat} : peso específico saturado; C: cohesión; Φ : ángulo de fricción interna.

(*) Valor estimado a partir de estudios anteriores.

Fuente: Elaboración propia.

6. Resultados del análisis de estabilidad de taludes

Los análisis de estabilidad de la presa se realizaron considerando el relave grueso sin exposición, año cero y expuesto a los agentes meteorológicos. Para el primer caso, se han obtenido valores de FS de 1,014 en condición pseudo-estática (ver Figura 6). Para el relave con exposición a los agentes meteorológicos, se han obtenido valores de FS de 1,060 en condición pseudo-estática (ver Figura 7).

DISCUSIÓN

1. Granulometría de los relaves

Peters (2004) señala que la granulometría de los relaves es el reflejo del proceso de tratamiento utilizado para la obtención del mineral, el sistema de colocación y el método del vertido. Las playas de

vertido tienen cierta pendiente hacia el vaso donde se depositan los relaves finos, dicha pendiente es de 0,5% a 3,0% en los primeros 30 m, luego se suaviza hasta alcanzar valores del orden de 0,1% en las proximidades del estanque. En relaves gruesos, las pendientes medias pueden llegar hasta 4% y 6%. En tamaño, los relaves son materiales generalmente superiores a 0,074 mm, esto significa que menos del 50% son más finos que ese tamaño. Además, las lamas son “el material predominantemente del tamaño del limo, por lo cual, más del 50% y menor de 0,074 mm” (Torres, 2014, p. 42).

2. Variación del esfuerzo desviador y presión de poros respecto a la deformación de las muestras de relave con el periodo de exposición de agentes meteorológicos

La Figura 8 muestra la comparación entre los resultados del esfuerzo desviador y la deformación para

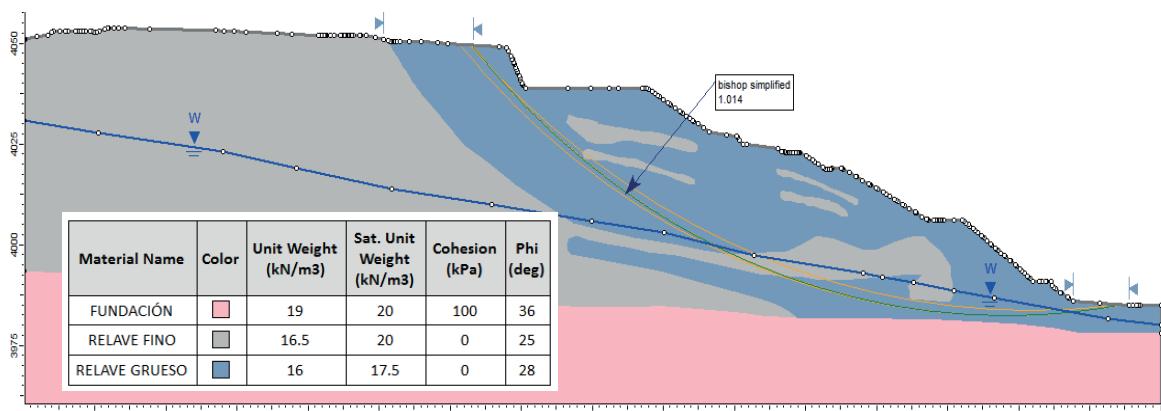


Figura 6. Análisis de estabilidad de la presa de relaves N.º 3. Análisis PE, sin exposición meteorológica (año 0), falla circular.

Fuente: Elaboración propia.

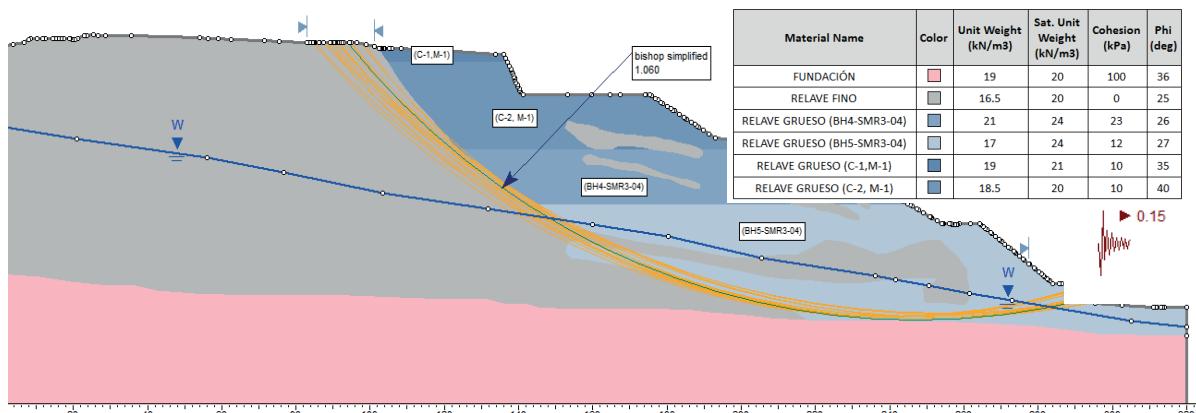


Figura 7. Análisis de estabilidad de la presa de relaves N.º 3. Análisis PE, con exposición meteorológica, falla circular.

Fuente: Elaboración propia.

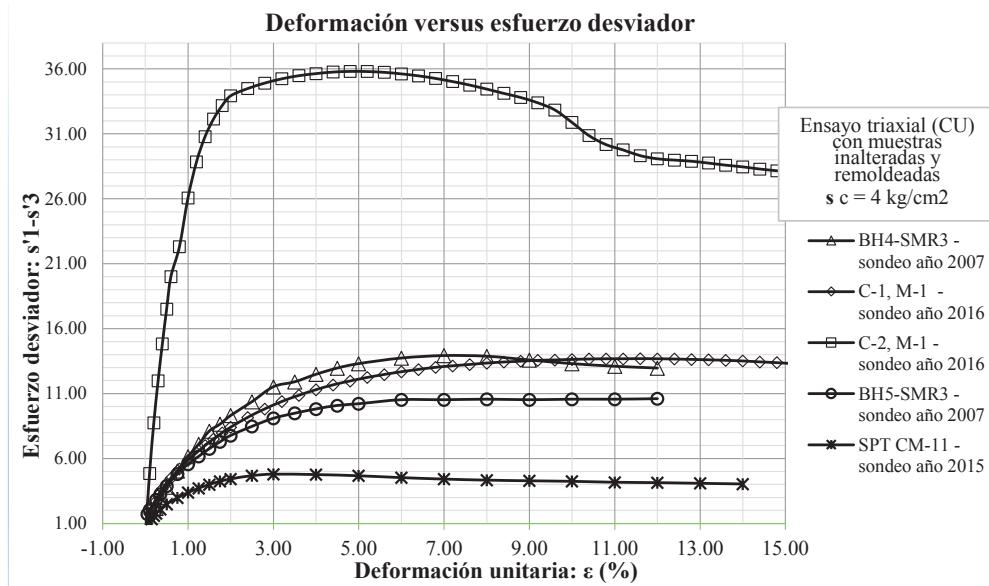


Figura 8. Deformación unitaria (ϵ) versus esfuerzo desviador de la muestra remoldeada y muestras inalteradas ensayadas en diferentes períodos.

Fuente: Elaboración propia.

las diferentes muestras analizadas, cuya presión de cámara aplicada es de 4 kg/cm^2 , teniendo en cuenta la estimación de los años de disposición de relaves ante procesos meteorológicos en la presa N.º 3.

Para el caso de la muestra (alterada) que representa el año cero, la falla es de tipo frágil, porque, al aumentar el esfuerzo, la deformación crece y tiende a un valor límite que se conserva, a pesar de que la deformación siga creciendo hasta valores muy grandes. Para las muestras inalteradas (años 3, 4, 6 y 7 de disposición de relave), aumenta el esfuerzo respecto al año cero, lo cual corresponde a una falla de tipo frágil, es decir, cuando el esfuerzo llega a un máximo, disminuye conforme la deformación au-

menta, pero al crecer la deformación, el valor último tiende a ser el mismo. En el caso de la muestra que representa el año 6 (C-2 M-1), el gráfico esfuerzo versus deformación corresponde a la arena cementada, en otras palabras, la disminución rápida del esfuerzo a partir del valor máximo ocurre al crecer la deformación.

La Figura 9 muestra la presión de cámara aplicada σ_3 , para las diferentes muestras inalteradas y remoldeadas, la resistencia es soportada inicialmente por el agua, de allí empieza el aumento de la presión de poros. Para la muestra remoldeada SPT CM-11, la presión de agua soporta en todo momento a la resistencia del material de relave. La presión

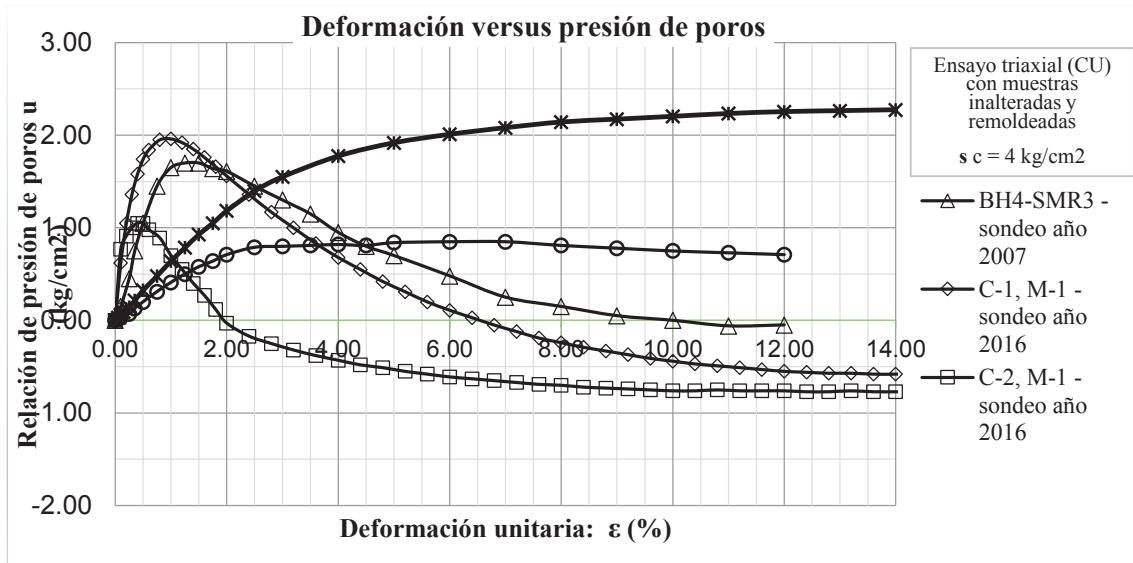


Figura 9. Deformación unitaria (ϵ) versus presión de poros (u) de las muestras inalteradas ensayadas en diferentes periodos y de la muestra remoldeada.

Fuente: Elaboración propia.

de poros se vuelve negativa en la muestra BH4-SMR3, a partir de la deformación unitaria 10.0%; en la muestra C-1 M-1, a partir de la deformación 6,5%; y en la muestra C-2 M-1, a partir de la deformación 2.0%. Esta disminución y cambio de signo en la presión de poros significa que la carga está siendo soportada por las partículas de relave y que aumenta la tensión efectiva del relave.

3. Variación de la densidad del relave con el periodo de exposición meteorológica y su influencia con los parámetros de resistencia cortante

De acuerdo a las muestras estudiadas en diferentes periodos de disposición del relave grueso, la densidad natural, para el año cero ("0") es de 1,77 g/cm³; para el año 3 es de 2,33 g/cm³; para el año 4 es de 2,18 g/cm³; para el año 6 es de 2,02 g/cm³; y para el año 7 es de 2,06 g/cm³. Como se indicó, la densidad inicial (año cero) es baja; sin embargo, según pasan los años de disposición del relave, se incrementan las densidades. De la misma forma ocurre con los parámetros de resistencia cortante, pues estos se intensifican debido a la consolidación secundaria. Sobre ese punto, Badillo y Rodríguez (2005) señalan que la consolidación secundaria se atribuye generalmente al deslizamiento progresivo referido al tiempo entre las partículas del material que se reacomodan y se obtienen en un estado más compacto para adaptarse a la nueva condición de carga. Entonces, el grado de consolidación influye notablemente en las propiedades de los re-

laves, los hace menos deformables, más densos y resistentes. Además, resaltan las variaciones en la densidad seca durante la consolidación con la reducción del índice de poros, lo cual lleva a la formación de estructuras más compactas y rígidas. En algunos casos, los relaves mineros presentan una importante consolidación secundaria (sin aumento de carga vertical), bien por disgregación de partículas o por fenómenos de fluencia viscosa (Ayala y Rodríguez, 1986).

4. Factores de seguridad del análisis de estabilidad

Según los resultados de análisis de estabilidad de la presa, los FS para la presa de relaves N.º 3, con el material de relave expuesto a la meteorización, son más estables en condición PE.

CONCLUSIONES

- Se evaluó el comportamiento de la resistencia cortante del material de relleno conformado por relave grueso, además, se tuvo en cuenta las causas meteorológicas y los posibles efectos en la estabilidad física de la presa de relaves N.º 3. Considerando ese fin, se realizaron sondeos para obtener muestras inalteradas del material de relave y se siguieron los procedimientos normalizados. Luego de la extracción de las muestras, se desarrollaron y validaron los ensayos triaxiales tipo CU con medición de

la presión de poros. Estos ensayos reflejaron las características de esfuerzo-deformación y resistencia del suelo por las circunstancias críticas de la presa de relave, por los efectos de perturbación de la muestra inalterada y, por ende, de los efectos meteorológicos.

- Los resultados del ángulo de fricción (ϕ) obtenidos del relave grueso, en diferentes períodos de exposición a la meteorización de la presa de relaves N.º 3, en términos de esfuerzos totales y efectivos, fueron los siguientes: para el año 4, 35°, y para el año 6, 52° y 51°. De acuerdo a la información previa, para el relave sin exposición meteorológica (año 0) fue de 16,5° y 31,5°, para el año 3 fueron 26° y 41,4°, y para el año 7 fueron 27° y 36,4°. Esta obtención indica que el ángulo de fricción aumentó conforme se incrementó el periodo de exposición a los agentes meteorológicos.
- Los resultados de la cohesión (c) del relave grueso obtenidos en diferentes períodos de exposición a los agentes meteorológicos, en términos de esfuerzos totales y efectivos, fueron los siguientes: para el año 4, 50 kPa y 78 kPa, y para el año 6, 90 kPa y 120 kPa. De acuerdo a la información previa sobre la presa de relaves N.º 3, para el año 0 fueron 0 kPa y 3 kPa, para el año 3, 230 kPa y 0 kPa, y para el año 7, 120 kPa y 29 kPa. Esta obtención indica que la cohesión aumentó conforme se incrementó el periodo de exposición a los agentes meteorológicos.
- La densidad natural también obtuvo resultados: para el año cero "0" resultó 1,77 g/cm³, para el año 3 resultó 2,33 g/cm³, para el año 4 resultó 2,18 g/cm³, para el año 6 resultó 2,02 g/cm³ y para el año 7 resultó 2,06 g/cm³. En otras palabras, para el año inicial la densidad es baja, y —según incrementan los años de exposición a los agentes meteorológicos— aumentan las densidades; por lo tanto, los parámetros de resistencia cortante se deben a la consolidación secundaria. Por ello mismo, Das (2013) señala que la consolidación secundaria del suelo se produce luego de la disipación total del exceso de presión del agua intersticial, cuando se lleva a cabo alguna deformación de la muestra por al reajuste plástico del suelo.
- A partir del incremento de la cohesión en materiales básicamente cohesivos en los relaves ensayados (arena con contenido de finos de 21,99 % en promedio, es decir,

porcentaje de finos bajo malla #200), se determinó que la cohesión se incrementó. Esto produjo una progresiva cementación del material a causa del contenido mineralógico del relave, occasionando presiones intergranulares por los efectos capilares, produciendo además una "cohesión aparente". Vale añadir que, según Lambe y Whitman (1991), la cohesión aparente se pierde en cuanto el suelo se sumerge bajo el nivel freático.

- Para el relave grueso sin exposición a los agentes meteorológicos se obtuvo un FS de 1,014 en condición pseudo-estática (PE) y para el relave con exposición se obtuvo un FS de 1,060 en condición PE. Es decir, los FS en condición expuesta a estos agentes son mayores que los FS sin exposición. Estos valores indican que la presa de relaves N.º 3, con el material de relave expuesto a la meteorización, es más estable en condición PE.

AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros Enrique Guadalupe Gómez, Víctor Abel Tolentino Yparraguirre y Jorge Escalante Contreras, catedráticos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por su constante apoyo en la revisión y por las correcciones acertadas. Asimismo, a Volcan Compañía Minera S. A. A., por facilitar sus instalaciones para el estudio pertinente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ayala, F. y Rodríguez, J. (1986). *Manual para el diseño y construcción de escombreras y presas de residuos mineros*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- [2] Actis, R. A. (2000). *Diques de colas mineras. Cálculo, diseño, construcción y operación*. Córdoba, Argentina: Fundación EMPREMIN.
- [3] Badillo, J. y Rodríguez, R. (2005). *Fundamentos de Mecánica de Suelos* (tomo 1). México D. F., México: Limusa Noriega Editores.
- [4] Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México D. F., México: Cengage Learning Latinoamérica.
- [5] González de Vallejo L., Ferrer M., Ortúñoz L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid, España: Pearson Education.
- [6] Hynes-Griffin, M. E. y Franklin, A. G. (1984). *Rationalizing the Seismic Coefficient Method*. Recuperado de <http://acwc.sdp>.

- sirsi.net/client/en_US/default/index.assetbox.assetactionicon.view/1003264
- [7] Joshi, R. C., Achari, G. Kaniraj, S. R. y Wijiweera, H. (1995). Effect of aging on the penetration resistance of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 767-782.
- [8] Lambe, T. W. y Whitman, R. V. (1991). *Mecánica de fluidos*. Mexico D. F., Mexico: Limusa Noriega Editores.
- [9] Ormazábal, M. G. (2008). *Estudio en laboratorio del efecto envejecimiento en el comportamiento de arenas de relave*. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104855/ormazabal_ml.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [10] Peters, G. (2004). Propiedades geotécnicas de arenas de relave y sus implicancias en el diseño de tanques. En E. Riesco (Presidencia), *V Congreso Chileno de Ingeniería Geotecnica*. Conferencia llevada a cabo en la Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- [11] Quispe, A. (2015). *Factor de seguridad en la estabilidad en pad de lixiviación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5606>
- [12] Rodríguez, R. y Oldecop, L. (2011). *Humedad y estabilidad geotécnica de presa de relaves*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/306292392_Humedad_y_estabilidad_geotecnica_de_presas_de_relaves.
- [13] Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A., et al. (2007). Reported tailing dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846-852.
- [14] Rennat, E. y Miller, S. (1997). *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina*. Lima, Perú. Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guiaestabilidad.pdf>
- [15] Richefeu, V., El Youssoufi, M. S. y Radjaï, F. (2006). Shear strength properties of wet granular materials. *Physical Review*, (73), 1-12. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/6981623_Shear_strength_properties_of_wet_granular_materials.
- [16] Torres, E. (2014). *Práctica supervisada. Proyecto de sistema de sedimentación para la compañía minera El Aguilar*. Recuperado de <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1533>.