

Análisis de relaves filtrados para la estabilización física en la conformación de una presa

Resumen



Ronald Chilon Chilon¹

ronald.chilon@unmsm.com.pe



Actualmente se discuten varios problemas relacionados con el desempeño de las represas de relaves en las empresas mineras, ya que para construir de manera convencional se debe tener un área considerable y no debe afectar el ecosistema en la zona porque construir una presa de relaves cerca a una población o fuentes de agua sería causante de grandes daños ambientales, económicos y sociales ante una ruptura de la presa. Frente a esta problemática proponemos el análisis de filtrar relaves y con ello conformar el dique que sería una mezcla con el desmonte de mina Esperanza en una relación de (3Relave+1Desmonte de Mina) y la conformación del vaso de relave que sería solo con relave filtrado. En el presente artículo mostraremos los procedimientos de análisis de relaves filtrados en la conformación de la represa minera, las pruebas piloto con ayuda de un filtro prensa, para tener la certeza de una humedad óptima para la conformación del dique y la disposición en el vaso. Con el análisis de estabilidad física garantizamos la seguridad para condiciones estadísticas mayores a 1.5 y condiciones pseudoestáticas mayores a 1.0 según las normativas del Ministerio de Energía y Minas.

Palabras clave: Relaves filtrados, Filtro prensa, Estabilidad de taludes.



Cómo citar este artículo: Análisis de relaves filtrados para la estabilización física en la conformación de una presa. (2025). *Aporte Santiaguino*, 18(2), pp. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n2.1232>.



Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima - Perú.

Recibido: 2025-08-10 | Aceptado: 2025-11-12



Consequences of the excessive use of pesticides in maize (*Zea mays* L.) cultivation in the Callejón de Huaylas, 2018-2019 season

Several issues related to the performance of tailings dams in mining companies are currently being discussed. Conventional construction requires a considerable area and must not affect the local ecosystem. Building a tailings dam near a population or water source would cause significant environmental, economic, and social damage in the event of a dam failure. Addressing this issue, we propose analyzing filtered tailings and thereby forming the dam, which would be a mixture of the Esperanza mine waste in a ratio of (3 tailings + 1 mine waste) and forming the tailings basin, which would consist solely of filtered tailings. In this article, we will present the procedures for analyzing filtered tailings in the construction of the mining dam, as well as pilot tests using a filter press to ensure optimal moisture content for the dam's construction and disposal in the basin. With the physical stability analysis we guarantee safety for statistic conditions greater than 1.5 and pseudo-static conditions greater than 1.0 according to the regulations of the Ministry of Energy and Mines.

Keywords: Filtered Tailings, Filter Press, Slope Stability.

Introducción

En el Perú, OSINERGMIN indica que en la minería el problema principal es el manejo del relave porque ocupa grandes extensiones de áreas la construcción de depósitos residuales, y por las grandes cantidades de mineral que se viene procesando ha causado el incremento de disposición de estos residuos en la minería, por ende, su llenado más rápido de los depósitos (Quispe, 2021).

El gran impacto que generan los relaves mineros en el Perú ha llegado hasta desequilibrar el ecosistema, afectando la salud humana, siendo

un alto contaminante de los flujos de aguas superficiales y subterráneos, y modificando sustancialmente el paisaje. La mala disposición y el pésimo manejo que se ejerce sobre éstos provocan riesgos inminentes siendo muchas veces de larga duración (Ledesma, 2018).

La mayor parte de los depósitos de relaves mineros o presas de relaves existentes en la actualidad se han construido mediante el sistema de relleno hidráulico. Técnicas nuevas de espesamiento y filtrado de relaves (cycloneados) permiten extraer porciones significativas del agua contenida en los relaves, que así se depositan en un estado más seco (Rodríguez y Oldecop, 2006).

Los depósitos donde se disponen relaves ocupan superficies extensas de terreno por tiempo indefinido. Tal disposición si no está aislada genera impacto por infiltración de las aguas de proceso contenidas en dicho relave. Según el tipo de suelo de contacto, esta infiltración puede alcanzar algún cuerpo receptor tal como un acuífero; las consecuencias de impacto ambiental pueden ser irreversibles (Apaza, 2019).

Actualmente, se discuten varios problemas relacionados con el desempeño de estas represas, si bien cada depósito de relaves tiene características únicas y que reflejan las particularidades físicas, geoquímicas, hidrológicas específicas del lugar. Son estas particularidades las que contribuyen a configurar el diseño más apropiado para lograr un desempeño adecuado en un depósito de relaves filtrados. Uno de ellos es la Minera Huayllay que no tiene suficiente área para construir una represa de relaves, o construirlos en áreas ya estudiadas sería causante de grandes daños ambientales, económicos y sociales.

Frente a esta problemática presentamos filtrar relaves para poder diseñar, construir, operar y cerrar el depósito de relaves filtrados de una manera segura y responsable con el medioambiente y la sociedad.

Métodos

En el presente artículo planteamos el tipo de investigación a seguir según, lo cual nos ayuda a enmarcar al nivel de estudio que se quiere llegar, basándose específicamente en la metodología aplicada y todas las herramientas que nos ayuden a desarrollar la investigación.

Tipo y nivel de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que se aplican los principios de la ciencia utilizando el equipo filtro prensa para sacar la mayor cantidad de agua del relave y así obtener un contenido óptimo de humedad de 14 % para su conformación.

La investigación es de nivel explicativa, porque el interés está en explicar los beneficios de filtrar relaves y su posterior conformación como presa de relaves que nos garantiza una estabilidad superior a las disposiciones tradicionales.

Métodos de investigación

El método general es el científico. Se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas antecedentes)

para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador (Hernández, 2014).

Para obtener el resultado óptimo se debe manipular el tiempo de filtrado, porcentaje de humedad, se debe tener el análisis granulométrico del relave, la cantidad de placas de membrana, todas estas variables deben tener valores fijos al final del experimento.

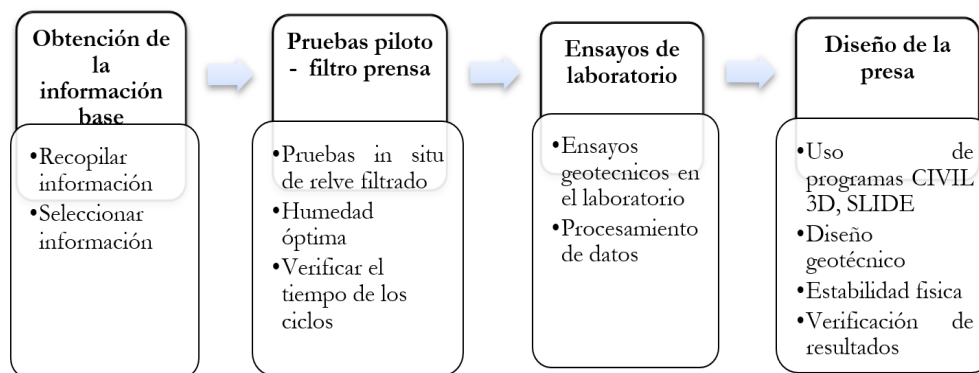
Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es experimental ya que los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control (Hernández, 2014).

En nuestro caso, son 3 grupos de control. Se realizaron 03 tratamientos. Los porcentajes de la variable independiente fueron 12,82 %, 12,04 % y 10,81 % de humedad del relave filtrado. Para lo cual se utilizó una muestra de 25 Kg de relave, obteniendo un total de 03 muestras.

Figura 1

Procedimiento de análisis de relaves filtrados en la conformación de la presa



Resultados

Ejecución del plan operativo de investigación

En el presente artículo, el plan operativo se inicia con la instalación de un equipo piloto en la unidad minera para poder realizar los ensayos de relave en el filtro prensa, con diferentes parámetros.

La técnica de recolección de datos implica elaborar un plan detallado de procedimientos que nos conduzcan a reunir datos con un propósito específico (Hernández, 2014).

Los relaves fueron producidos en la planta de filtrado, la cual se localiza aguas arriba del depósito Huayllay, en el lado izquierdo de la quebrada Quimacocha. La planta de filtrado está conformada por filtros prensa, los cuales desecaron los relaves desde una concentración de sólidos de 65 a 70 % al ingreso de filtro hasta un contenido de sólidos mínimo de 86 % a la salida del filtro.

Una muestra de relave extraída de la planta se pasa a homogenizar para tener un resultado óptimo de la prueba.

Figura 2

Homogenización de muestras de relave



Los detalles de datos experimentales obtenidos de las pruebas de filtración, utilizando el filtro prensa a nivel piloto, se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1

Datos Pruebas Piloto

Datos de filtración del relave total								
Nº Prueba	Densidad (g/L)	Alimentación (min)	Membrana (min)	Secado (min)	Proceso (min)	Ciclo Total (min)	Presión Max. (bar)	Espesor torta (mm)
1	1,420	10	2	6	5	23	10	38
2	1,420	10	2	6	5	23	10	38
3	1,500	9	2	5	5	21	10	38

En la Tabla 1, se observa los datos de la densidad del relave usado para esta prueba, la alimentación en minutos, el número de membranas usadas, el tiempo de secado para obtener el producto deshidratado, el ciclo de duración del filtrado desde la colocación del relave en el envase de extracción, la presión máxima y el espesor de la torta. Con esto veremos en el resultado el porcentaje de humedades que sale en cada prueba realizada.

Diseño geotécnico

El depósito de relaves almacena relave filtrado puro y mezcla de relave filtrado con material de desmonte de mina seleccionado, en una proporción de 3:1 respectivamente, ambos materiales fueron conformados por equipos pesados. El depósito estuvo constituido por dos componentes principales:

- Dique de contención compuesto con material de mezcla en la proporción de 3:1 (Relave filtrado y material de desmonte de mina), y
- Vaso de relave filtrado puro, conformación en capas con solo el relave sin la mezcla de desmonte.

Descripción general del proceso de producción y colocación de relaves.

Los relaves serán producidos en la planta de filtrado, la cual se localizará aguas arriba del depósito, en el lado izquierdo de la quebrada. La planta de filtrado está conformada por filtros prensa los cuales desecarán los relaves desde una concentración de sólidos de 65 a 70 % al ingreso de filtro hasta un contenido de sólidos mínimo de 86 % a la salida del filtro.

Los relaves fueron apilados en el área de la planta de filtrado. El carguío de los relaves se realizó mediante un cargador frontal, para el transporte se usarán camiones de 15 m³

toneladas de capacidad de carga. Los relaves fueron descargados y esparcidos mediante un tractor D6.

Los relaves depositados con una humedad natural de 14 % fueron esparcidos y pasaron por un ciclo mínimo de secado hasta alcanzar un contenido de humedad mejor o igual a 12 %, se mezclaron los relaves con desmonte de mina esperanza autorizadas que han sido establecidas en el estudio, luego el material mezcla se compactó a una densidad mínima del 95 % del Proctor modificado y humedad de 12 %.

La superficie de la plataforma final del vaso del depósito de Relaves se construyó con una pendiente de 1 % hacia la margen interior izquierda del valle, de manera que las aguas de lluvia en la plataforma puedan escurrir hacia una zona donde puedan ser evacuadas rápidamente del área del depósito de relaves.

El agregado de relaves filtrados con el desmonte se monitoreó geotécnicamente, se controló la densidad, la humedad de compactación y espesor de cada capa. Se controló las filtraciones captadas por el sistema de drenaje del depósito de relaves.

Parámetros claves por controlar durante la operación y niveles permisibles:

- Contenido mínimo de sólidos de la planta: 86 %;
- Densidad mínima para compactación (Dique): 95 % del Proctor modificado aprox. 2.10 ton/m³;
- Densidad mínima de colocación (Vaso): aprox. 1.80 ton/m³;
- Humedad máxima de compactación (Dique): 12 %;

- Humedad máxima de colocación (Vaso): 14 %;
- Espesor máximo de capa compactada (Dique): 0.35 m; y
- Espesor promedio de capa compactada (Dique): 0.30 m.

simultánea; sin embargo, para el presente artículo se ha utilizado el Método de Spencer empleando dovelas para el cálculo de superficies de falla. La superficie de falla crítica es definida como aquella que proporciona el menor factor de seguridad, y fue encontrada en forma interactiva modificando las condiciones de búsqueda de esta, evaluándose superficies de falla circulares y del tipo bloque.

Análisis de estabilidad física

El análisis de estabilidad de taludes implica determinar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo, determinándose un factor de seguridad.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

FS: Factor de seguridad

τ_f : Resistencia cortante del suelo

τ_d : Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla

Como hipótesis del análisis se considera que las propiedades de los materiales que conforman las diferentes 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. Cada material tiene sus propiedades y características físicas y mecánicas.

Para el análisis pseudoestático se considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una aceleración horizontal igual a un coeficiente sísmico multiplicado por la aceleración de la gravedad, esto con el objetivo de tomar en cuenta el efecto de las fuerzas inerciales producidas por el terremoto de diseño.

Metodología de análisis

Para los análisis de estabilidad de taludes, se utilizó el programa de cómputo SLIDE (Rocscience), versión 2018. Este es un programa de análisis de estabilidad de taludes completamente integrado, que permite: (1) desarrollar la geometría del talud interactivamente y (2) definir los tipos y propiedades de los materiales de manera muy amigable con el usuario.

El análisis para calcular el factor de seguridad se lleva a cabo de manera bidimensional usando el concepto de equilibrio límite. El programa tiene la opción de utilizar diferentes métodos de análisis de estabilidad de manera

Criterios de evaluación

En la Tabla 2, se presenta los valores de los factores de seguridad mínimos de acuerdo con el criterio del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y del Ministerio de Energía y Minas (MEM).

Tabla 3

Valores de factores de seguridad mínimos admisibles

Factor de seguridad	USACE	MEM
Estático	1.5	1.5
Pseudoestático	1.0	1.0

Nota. Obtenido de USACE; MEM.

Se debe indicar que un factor de seguridad pseudoestático mayor a 1.0 no significa que la estructura no se moverá durante un terremoto. Lo que probablemente ocurrirá es que los desplazamientos serán mínimos y no se producirán daños permanentes en la estructura, asociados al terremoto de diseño.

Aceleración de diseño

Para la sección, se consideró una aceleración sísmica de 0.16g resultado del estudio de riesgo sísmico, equivalente a un sismo con período de retorno de 500 años (sismo de cierre).

Características de los análisis

- Los escenarios de análisis se han considerado para condiciones estáticas y pseudo-estáticas.
- La sección ha sido analizada buscando obtener fallas críticas, sean circulares (método auto refine search) o no circulares (método cuckoo search).

- Propiedades de los Materiales del modelo geotécnico

Las propiedades de los materiales que intervinieron en el modelo geotécnico son las siguientes:

Prueba de hipótesis

Para la investigación se empleó la prueba empírica, para tomar la decisión con relación a ser aceptadas o rechazada, de acuerdo a la observación de los resultados reales del experimento, con la finalidad de contrastar la hipótesis.

Con los datos del plan piloto del relave filtrado y la caracterización geotécnica se pudo obtener resultados reales en cuanto a laboratorio y gabinete.

Con los análisis en las diferentes secciones de la presa se pudo determinar un factor de seguridad acorde con estándares nacionales e internacionales que nos asegura la construcción de la presa de una manera segura.

Tabla 4

Resultados de porcentaje de humedad

Datos y resultados de pruebas de filtración del relave total									
Nº Prueba	Densidad (g/L)	Alimentación (min)	Membrana (min)	Secado (min)	Proceso (min)	Ciclo Total (min)	Presión Max. (bar)	Espesor Torta (mm)	Humedad (%)
1	1,420	10	2	6	5	23	10	38	12.82
2	1,420	10	2	6	5	23	10	38	12.04
3	1,500	9	2	5	5	21	10	38	10.81

Como se muestra en la tabla 4, la primera prueba con los datos la fila 1 se ha obtenido una humedad de 12,82 %, la prueba 2, se obtiene una humedad de 12,04 % y la tercera prueba nos da

un resultado de 10,81 % de humedad, realizando un promedio entre los tres resultados se obtiene una humedad del 11,89 %.

Tabla 5

Modelo geotécnico

Unidad geotécnica	Peso específico (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Unidad 01: Roca de fundación	22	223	25
Unidad 02: Depósito fluvioglaciario	18	0	32
Unidad 03: Bofedal	16	30	10
Unidad 04: Bofedal consolidado	17	60	12
Unidad 05: Relave filtrado	19	30	30
Unidad 06: Material mezcla (3R:1P)	20	30	32
Unidad 07: Material de préstamo	20	5	38
Unidad 08: Filtro	19	0	32

En todas las unidades geotécnicas se utilizó el modelo constitutivo Mohr Coulomb (M-C) para realizar los análisis de estabilidad.

Secciones de análisis

El análisis de estabilidad se llevó a cabo sobre dos (02) secciones de análisis, las cuales se encuentran distribuidas de manera transversal en el relleno que se utilizó como dique para el depósito de relaves. Estas secciones cortan

perpendicularmente a las zonas más críticas o de mayor pendiente.

En este caso no analizamos las filtraciones (la red de flujo) y análisis de sifonamiento porque es una presa de relaves filtrados, se extrae la mayor cantidad de agua y por ende no son factores que afectan la estabilidad.

Figura 3

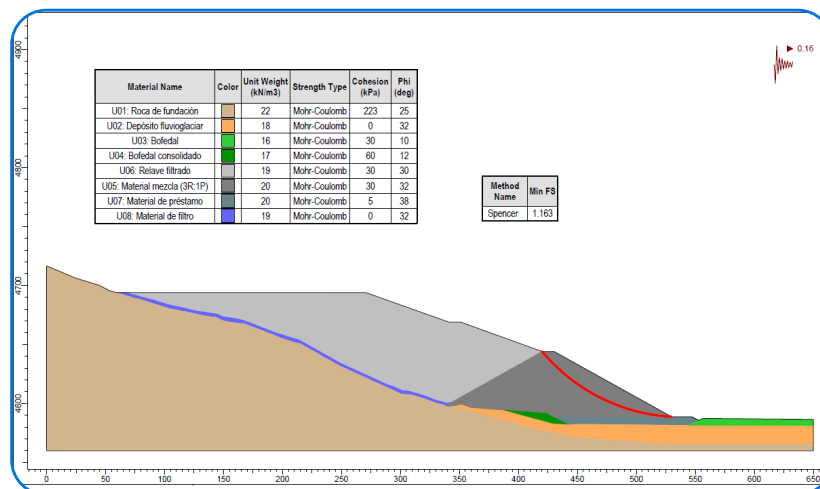
Análisis de estabilidad física - Estado pseudoestático ($k=0.16$) - Sección A

Figura 4

Análisis de estabilidad física - Estado estático ($k=0.00$) - Sección A

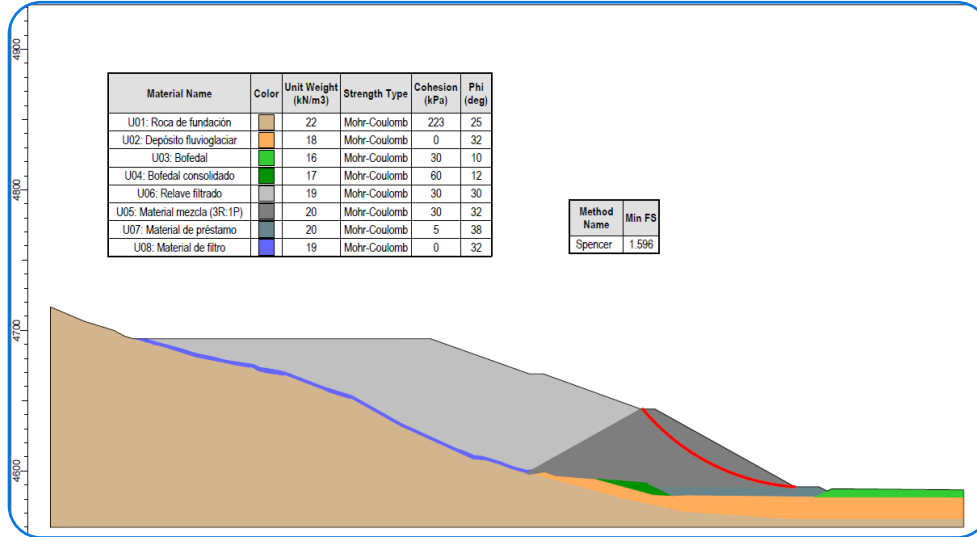


Figura 5

Análisis de estabilidad física - Estado estático ($k=0.00$) - Sección B

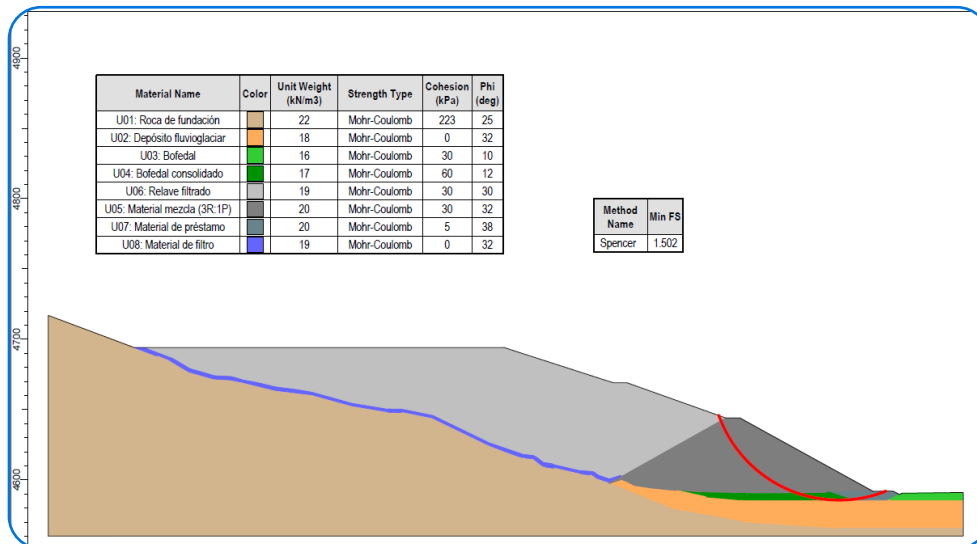


Figura 6

Análisis de estabilidad física - Estado estático ($k=0.00$) - Sección B

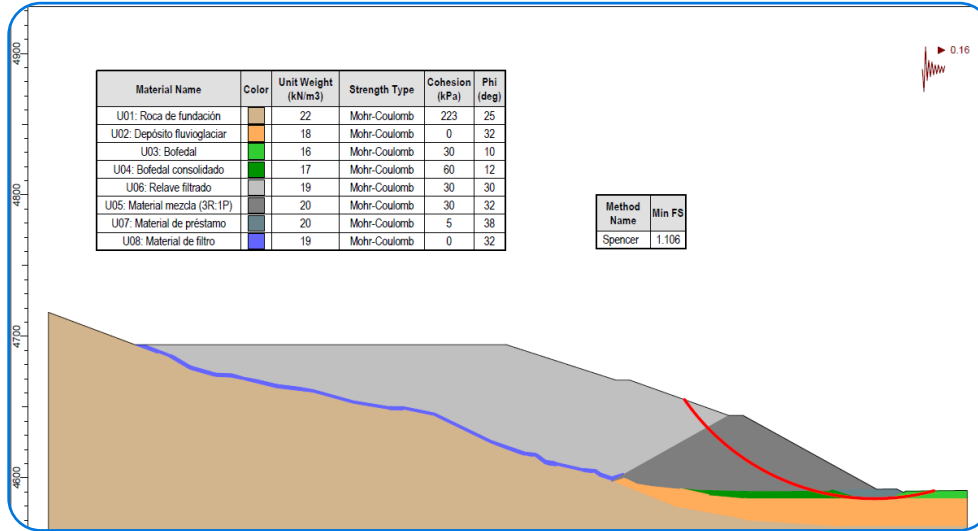


Tabla 6

Factores de seguridad de los depósitos de relave

Componente	Sección	Estático ($k=0.00$)	Pseudoestático ($k=0.16$)
Depósito de relaves filtrados	A-A	1.596	1.163
	B-B	1.502	1.106

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 6, se puede concluir que la sección presenta valores de estabilidad física para condiciones estáticas y pseudo estáticas mayores que los recomendados por el Ministerio de Energía y Minas.

Discusión

En el análisis y en los resultados del filtro piloto el relave filtrado fino se llegó a un porcentaje de humedad del 11,89 %, aclarando que este porcentaje es para el dique de contención, ya que en el vaso debemos garantizar un porcentaje menor 14 % de humedad para lograr su estabilidad física.

Los relaves filtrados producidos en la planta de filtrado deberán salir con un contenido mínimo de sólidos de 86 % o un contenido máximo de humedad de 14 %, lo cual varía en el contenido de sólidos y en la humedad esto se debe principalmente al factor del tipo de relave.

Conclusiones

Respecto a la viabilidad de filtrar relaves:

De las pruebas realizadas en campo con el filtro prensa se determinó que es factible obtener un porcentaje de humedad por debajo del 14 %. Este parámetro garantiza una conformación estable de la presa de relave, como se observa en la Tabla 4. En la primera prueba, se obtuvo una humedad de 12,82 %, la prueba 2, 12,04 % y la tercera prueba de 10,81 % de humedad. Realizando un promedio entre los tres resultados se obtiene una humedad del 11,89 % muy por debajo del 14 %.

Respecto al análisis de estabilidad física:

Del análisis del talud de la presa según la caracterización geotécnica, con la ayuda del programa Slide se determinó los factores de seguridad en las secciones más críticas. Análisis en la Sección A-A, el valor estático mostró como resultado de 1.596 y el pseudoestático ($k=0.16$) un valor de 1.163. en la sección B-B, el valor estático nos da un valor de 1.502 y el pseudoestático ($k=0.16$) un valor de 1.106. Estos resultados son mucho mayores a la normativa del Ministerio de Energía y Minas que para condición estática debe ser mayor que 1.5 y para condiciones pseudoestáticas mayores a 1.0. El análisis físico para el depósito en las dos secciones críticas evaluadas garantiza la estabilidad de la presa.

Referencias

- Almerco Palomino, D. (2014). *Construcción de dique con tratamiento del relave, en mina Catalina Huanca – Región Ayacucho* [Tesis para optar el título de Ingeniería Civil, Universidad de San Martín de Porres].
- AMC, Asociación de Minería de Canadá (2019). *Guía para el Manejo de Depósitos de Relaves*. Canadá.
- Apaza Quispe, S. (2019). Diseño de recrecimiento de la presa de relaves de la unidad de producción Untuca-Minera Cori Puno SAC. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional del Altiplano de Puno].
- Arroyo, A. (2012). *Metodología de la investigación Científica*.
- Braga Calderón, I. (2016). *Filtros de prensa para relaves* [Tesis para optar al grado de magíster en gestión y dirección de empresas, Universidad de Chile de Santiago].
- Cabrera Huamán, J. (2017). Previsão numérica do comportamento sísmico da barragem de rejeitos de Alpamarca no Perú [Tesis para optar el grado de Magíster, Pontificia Universidad Católica do Río de Janeiro].
- Cidelco S.A.C (2018). *Fabricación de filtros prensa*.
- Golder Associates (2009) “Ensayos geoquímicos de la desmontera Esperanza”. Lima, Perú.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta Edición).
- Huaña Gonzales, O. (2015). *Diseño de depósitos de relaves filtrados* [Tesis para el título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería].
- INGEMMET (1996). *Boletín Geología del Cuadrángulo Cerro de Pasco*, Hoja 22-K.
- Lara, J. (2013). *Experiencias de Operación de Depósitos de Relaves Espesados y Filtrados*. Golder Associates.

Ministerio de Energía y Minas (1995). *Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros*.

Ministerio de Energía y Minas (1997). *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina*.

Oré, G., Parodi, M. (2008). *Evaluaciones y modelamientos geotécnicos para la ampliación de depósitos de relaves* [Tesis para el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Privada Ricardo Palma].

Quispe Isidro, E. (2021). *Análisis del Relave Filtrado como Sustituto del Relleno Estructural para Terraplenes de Relaves Filtrados, Unidad Cerro Lindo – Chavín – Chincha* [Tesis para el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Privada César Vallejo].

Rodriguez, P.R.; Oldecop, L. (2006). *Influencia del agua en el comportamiento de los relaves mineros*. Instituto Geológico y Minero de España. España.

Salazar Romero, S. (2018). *Estabilidad física de la presa de relaves para el nivel de crecimiento hasta la cota 4,320 m.s.n.m. utilizando relave cicloneado* [Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad Peruana Los Andes].

Taco Juárez, G. (2018). *Evaluación del comportamiento dinámico de la presa de relaves Ocroyoc a partir del análisis del contenido frecuencial en registros sísmicos y vibraciones ambientales* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].