

Evaluación de la estabilidad física del depósito integrado de relaves San Andrés (Perú)

Evaluating the physical stability of integrated tailings deposit San Andrés (Peru)

Paulino José Avellaneda-Puri^{1*}, Carmen Judith Avellaneda-Cristóbal²

¹Universidad Nacional del Centro de Perú, Perú.

²Universidad Peruana Los Andes, Perú.

*Autor para correspondencia: pavellaneda@uncp.edu.pe

Resumen

El depósito de relaves de la Concesión de Beneficio San Andrés, ubicada en La Libertad, Perú, almacena relaves en dos depósitos que están integrados, uno para relaves de flotación y el otro para relaves de cianuración; el almacenamiento se efectúa por el método de eje central. El propósito de este estudio fue determinar la estabilidad física durante la fase de operación, encaminada a controlar la cantidad y calidad de los relaves, la altura y ángulos de talud del dique principal; mantener el espejo de aguas alejada del dique; conservar el desnivel entre la corona del dique y el nivel de espejo de aguas sobre una altura mínima de dos metros (borde libre); detectar deformaciones o asentamientos, filtraciones anormales en el dique o presencia de grietas. Los resultados de los factores de seguridad para ambos depósitos de relaves arrojan valores superiores a los factores de seguridad mínimos requeridos por la legislación vigente, por lo que se concluye que ambas estructuras son físicamente estables, tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas.

Palabras clave: depósitos de relaves; estabilidad de taludes; factor de seguridad; condición estática; condición pseudo-estática.

Abstract

Tailings deposit of San Andrés Benefit Concession, located in La Libertad, Peru, stores tailings in two integrated deposits, one for flotation tailings and

the other for cyanidation tailings; the storage is done by the central axis method. The purpose of this study was to determine the physical stability during the operation phase, aimed at controlling the quality and quantity of tailings; the height and slope angles of the main dike; to keep water mirror away from the dike; to conserve the difference between the crown of the dike and the level of the water mirror over a minimum height of 2 m (free edge); and detecting deformations or settlements, abnormal leaks in the dike or cracks presence. Results of the safety factors for both tailings deposits, showed higher values than the minimum safety factors required by current legislation, so it is concluded that both structures are physically stable, both in static and pseudo-static conditions.

Keywords: tailings deposits; slope stability; security factor; static condition; pseudo-static condition.

1. INTRODUCCIÓN

El sector minero en Perú es uno de los pilares de la economía y a la vez de las exportaciones, para ello se cuenta con un enorme potencial geológico; la presencia de la Cordillera de los Andes a lo largo del territorio constituye la principal fuente de recursos minerales. A nivel mundial y latinoamericano el Perú se ubica entre los primeros productores de diversos metales (oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, telurio, entre otros).

La disposición de relaves generados por la planta de beneficio San Andrés se efectúa en dos depósitos que, a la vez, están integrados, uno para relaves de flotación y el otro para relaves de cianuración, los que deben asegurar la estabilidad física y química. El titular de la Concesión de Beneficio San Andrés está a cargo de la gestión del Depósito Integrado de Relaves San Andrés.

El propósito de este estudio fue determinar, durante la operación, la estabilidad física de los depósitos de relaves San Andrés, cuyas acciones estuvieron encaminadas a controlar la cantidad y calidad de los relaves para conservar, de acuerdo al diseño, la altura y los ángulos de talud del dique de relaves gruesos (dique principal); mantener el espejo de aguas alejada del dique; conservar el desnivel entre la corona del dique y el nivel de espejo de aguas sobre una altura mínima de dos metros (borde libre); detectar posibles deformaciones o asentamientos, filtraciones anormales en el dique o presencia de grietas, entre otros.

La mayoría de los depósitos de relaves existentes en la actualidad se han construido mediante el sistema de relleno hidráulico, que consiste en captar los relaves de la planta concentradora y transportarlas por tubería mezclados

con agua. Los residuos del proceso de flotación, en esencia roca finamente molida mezclada con agua, con la consistencia de un lodo llamado pulpa, son bombeados a través de tuberías hacia el depósito. Es característico en los relaves la proporción de agua en relación a los sólidos, mayor de 3:1 en volumen (Oldecop *et al.* 2008).

En la última década se han sumado nuevos aspectos relacionados a las condiciones ambientales que influyen en las evaluaciones de estabilidad física. En este ámbito, se pueden destacar las crecientes regulaciones ambientales que han de ser concluyentemente acatadas y, además, el creciente déficit de recursos hídricos que amenaza el normal desempeño de las operaciones mineras (Peters, Verdugo, Echevarría y Caro 2014). La infiltración de aguas superficiales procedentes de relaveras, escombreras piritosas, pilas de lixiviación, áreas de beneficio y desechos humanos, causan serios daños en la calidad del agua subterránea (Tovar-Pacheco 2015).

La estabilidad física en un depósito de relaves se puede ver afectada por varios mecanismos de falla, los que en términos generales pueden ser representados por los mecanismos de desbordamiento, tubificación e inestabilidad de taludes (Equipo Programa Tranque, Fundación Chile 2018).

La mala infraestructura de los depósitos de relaves es uno de los factores determinantes para que ocurran deslizamientos. Por ejemplo, lo correcto es que el depósito de relaves tenga en su base túneles elaborados a manera de sub-dren, lo que caracteriza al Depósito de Relaves San Andrés en relación a las demás infraestructuras de otras minas en Perú; a través de los túneles se evacúan las aguas de filtraciones y se evita la saturación de los relaves. Del mismo modo se evita la filtración de los efluentes minero-metalúrgicos en el subsuelo y, consecuentemente, la contaminación de aguas subterráneas.

Las fallas del suelo de fundación se generan debido a una falta de información o malinterpretación de los antecedentes en cuanto a la localización del depósito de relave (geología, hidrogeología y geotecnia, entre otros). Si existe un estrato de suelo débil o roca blanda, situada a una reducida profundidad bajo la estructura, se podrían generar movimientos a lo largo de un plano de falla si el peso del depósito produce esfuerzos que superen la resistencia al corte de los suelos que conforman el estrato débil (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso 2018).

Las consecuencias que se advierten por el mal manejo de los depósitos de relaves son:

Inestabilidad física y química, por la existencia de aguas subterráneas y al sobrepeso de carga, como consecuencia del recrecimiento del depósito de relaves.

Contaminación de los cuerpos receptores, que son aguas para consumo humano y el desarrollo de la agricultura.

1.1. Antecedentes del estudio

El titular de la Concesión de Beneficio San Andrés ha solicitado a la consultora Tecnología XXI S.A., inscrita en el Registro de Empresas Supervisoras en Seguridad y Salud Ocupacional del OSINERGMIN, efectuar el estudio de estabilidad física del Depósito Integrado de Relaves San Andrés, ubicado en la UEA Retamas.

En dicho estudio, el suscrito como consultor de Tecnología XXI S.A. ha encabezado los trabajos realizados que comprendieron las investigaciones en campo, pruebas en laboratorio y labores de gabinete; con la finalidad de verificar el cumplimiento del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (Ministerio de Energía y Minas 2018, Art. 400), que expresa: "El titular de actividad minera presentará a la autoridad competente, cada dos años, un estudio de estabilidad física de los depósitos de relaves, depósitos de desmontes, pilas de lixiviación y depósitos de escorias operativos, realizados por una empresa especializada en la materia, que garantice las operaciones de manera segura de dichos componentes".

Durante la inspección, la corona del dique principal del depósito de relaves de flotación presentaba una cota de 3 935,1 m. El dique se construye con la fracción gruesa de los relaves, mientras que el depósito para los relaves de cianuración está constituido por dos pozas (Figura 1), revestidas interiormente con geomembranas de polietileno HDPE de 1,5 mm de espesor.

ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C. (2009) ha efectuado el Modelamiento Numérico del Conducto de Drenaje Principal del Depósito de Relaves San Andrés, en ello indica: En la base del depósito de relaves integrado se encuentra instalado un conducto de drenaje principal, el cual está comprendido por una alcantarilla tipo ARMCO minimultiplate de 1,20 m de diámetro, de acero corrugado con recubrimiento galvanizado, revestida exteriormente por concreto armado de 0,20 m de espesor. El tubo ARMCO capta las aguas en situaciones extremas desde el espejo de relaves de flotación ubicada en la cola del depósito, a través de las queñas, cuya longitud aproximada del drenaje principal es de 800 m y su trayectoria sigue el fondo de la quebrada Mush Mush.

1.2. Ubicación geográfica

El Depósito Integrado de Relaves de San Andrés se encuentra ubicado en la quebrada conocida como Mush Mush Bajo, en el distrito de Parcoy, provincia de Patate, departamento de La Libertad, a una altitud que varía entre 3 900 m y 3 975 m sobre el NMM. El área de influencia directa está referida a la cuenca del río Parcoy, los principales centros poblados ubicados dentro de la cuenca son: Llacubamba, La Soledad, Retamas, Lúcumas, Parcoy y Pías.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Concesión de Beneficio San Andrés

La Planta de Beneficio San Andrés dispone de una capacidad de tratamiento instalada de 1 800 TMS/día; para la disposición final de sus relaves cuenta con un depósito integrado de relaves de flotación y otro de cianuración, en una proporción de almacenamiento en volumen de 8:1 (Figura 1).



Figura 1. Ubicación geográfica del Depósito Integrado de Relaves San Andrés (tomado de Google Earth 2019).

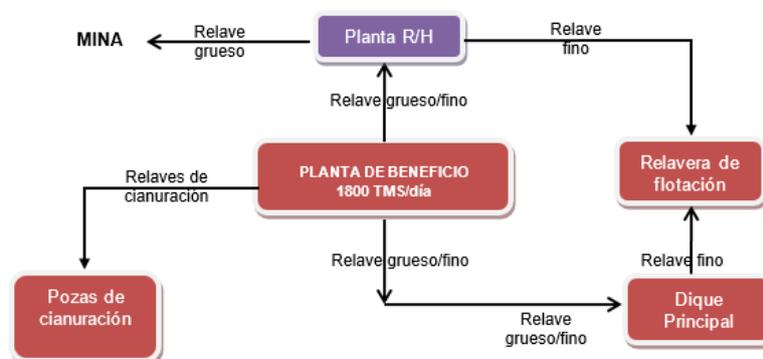


Figura 2. Disposición final de los relaves generados en la Planta de Beneficio San Andrés.

Los relaves gruesos son utilizados para la conformación del dique principal, mientras que los relaves finos son descargados al depósito de relaves de flotación (Figura 2).

Los relaves gruesos del Depósito de Relaves de Flotación son extendidos y compactados por capas de 30 cm, mediante la acción de un rodillo liso vibratorio (bulldozers), operando permanentemente en el talud aguas abajo y en la corona del dique principal.

2.2. Evaluación de la estabilidad física del depósito integrado de relaves San Andrés

Durante la visita a campo se verificaron in-situ los materiales que conforman el dique de contención de los depósitos de relaves de flotación y de cianuración que, conjuntamente con los resultados de laboratorio obtenidos en su oportunidad por SVS INGENIEROS S.A.C. (2009) y ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C. (2010a,b), han permitido determinar valores confiables de los parámetros resistentes para efectuar la presente evaluación, a cargo de TECNOLOGÍA XXI S.A.

El plano topográfico proporcionado por el titular de la concesión de beneficio cubre la zona donde se ha realizado la evaluación de la estabilidad física del dique principal y de los dos depósitos de relaves de cianuración.

2.2.1. Criterios de evaluación del dique principal del depósito de relaves de flotación

La construcción del dique principal de flotación tiene tres componentes principales: el primero está constituido por el dique de arranque, conformado por material granular de préstamo seleccionado, el cual fue construido en capas horizontales de espesor uniforme, compactadas mediante el uso de bulldozers; el segundo componente estructural está constituido por el dique de relaves gruesos, el que adicionalmente recibe un tratamiento de densificación; y el tercer componente está constituido por el contrafuerte, ubicado al pie del talud aguas abajo del dique principal para contribuir a la estabilidad del depósito (Figuras 1 y 3).

Los primeros 10 m de altura del dique principal corresponden al dique de arranque, cuya cresta alcanzó el nivel 3 893 m sobre el NMM; los 42,10 m superiores están conformados por relave grueso obtenido mediante la segregación con hidrociclones, alcanzándose en la corona el nivel 3 935,10 m sobre el NMM. Faltan exactamente 4,90 m para llegar a la cota de corona de 3 940 m sobre el NMM aprobado por el Ministerio de Energía y Minas.



Figura 3. Dique principal del depósito de relaves de flotación, al pie de este talud se ha construido el contrafuerte para contribuir a la estabilidad del depósito (Foto del autor 2011).

El crecimiento del depósito de relaves se realiza mediante el método de "eje central", el talud aguas abajo tiene una pendiente de 3H:1V; mientras que el talud aguas arriba muestra una pendiente de 2H:1V. El ancho de la corona según proyecto es 8,0 m; actualmente está en 14,0 m.

2.2.2. Criterios de evaluación del depósito de relaves de cianuración

Los relaves del proceso de cianuración son almacenados alternativamente en dos pozas ubicadas al pie de la margen izquierda del depósito integrado (Figura 1). Originalmente, los diques de las pozas de relaves de cianuración fueron diseñados para ser construidos con los mismos relaves de cianuración, no obstante, por consideraciones técnico ambientales se optó por reemplazar dichos relaves de cianuración por relaves gruesos de flotación mezclado con material de préstamo, los cuales fueron compactados en capas horizontales de espesor uniforme.

Actualmente la Poza de Cianuración N° 3 está en operación, mientras que la Poza de Cianuración N° 4 se encuentra en proceso de recrecimiento; para esta última etapa, la cota de la corona está fijada a 3 937 m sobre el NMM. El relave grueso de flotación y el material de préstamo son compactados, conformándose los diques y contrafuertes, que son recubiertos con geomembrana de 1,5 mm de espesor.

Los trabajos de recrecimiento de la Poza de Cianuración N° 4 considera el encapsulado con geomembrana del nivel inferior, después de esta vendrá una

capa de geomembrana, posterior una capa de geonet y finalmente otra de geomembrana. Durante la prueba de calibración de máquinas se ha solicitado al personal aplicar los esfuerzos de corte y tracción para muestras representativas de geomembranas, cuyos ensayos superaron el límite mínimo de 35 kg para corte y 45 kg para tracción, estando conforme con los estándares exigidos. Del mismo modo se hicieron pruebas de aire, habiéndose superado el límite mínimo de presión de aire, que es de 37 psi.

2.3. Peligro sísmico

La aceleración horizontal máxima se evaluó mediante el uso del programa RISK, considerándose 10 % de excedencia, 50 años de vida útil y un periodo de retorno de 475 años. Para la *fase de cierre* se obtuvo un valor de aceleración máxima de 300 cm/seg², para un sismo con periodo de retorno de 475 años. De manera similar para la *fase de operación* del depósito se consiguió un valor de aceleración máxima de 220 cm/seg², conveniente para un periodo de retorno de 150 años (CISMID 1997).

Dado que la aceleración máxima solo se manifiesta durante un periodo instantáneo, el coeficiente sísmico de diseño a usar en el análisis pseudo-estático se define como una fracción de la aceleración máxima. De conformidad con las recomendaciones del Ministerio de Energía y Minas (Rennat 1997) en la *Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina*, indica que la fracción de aceleración máxima está comprendida usualmente entre 1/2 y 2/3; considerando un factor de reducción de 1/2, el coeficiente sísmico de diseño para la fase de cierre es de 0,15; en tanto que para la fase de operación dicho coeficiente es de 0,11.

Mientras ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C. (2010b) en el estudio de peligro sísmico realizado también para el depósito de relaves San Andrés recomienda un valor de coeficiente sísmico $\alpha=0,13$ para roca, $\alpha=0,16$ para suelo Tipo C y D, estimado para 475 años de periodo de retorno.

Los coeficientes de la Consultora ZER resultan menores que los del CISMID, tomando en cuenta el coeficiente sísmico para roca en la que está emplazado el depósito de relaves San Andrés. Como tal para los cálculos de la estabilidad física en condiciones pseudo-estáticas se tomaron los coeficientes adoptados por el CISMID, considerando la influencia de la componente vertical del movimiento sísmico como los 2/3 del valor de la aceleración horizontal máxima de diseño.

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación en la condición actual del depósito de relaves de flotación (Nivel de Cresta: 3 935,10 m sobre el NMM)

Estructuralmente, este depósito está compuesto por un dique de arranque de material de préstamo compactado, con una longitud en su cresta de 160,5 m, 10 m de altura máxima y un ancho de cresta de 10 m. Sobre el dique de arranque se viene disponiendo y compactando relaves gruesos cicloneados, dispuestos en el talud aguas abajo. La inclinación de diseño de este talud es de 3,0H:1,0V, operacionalmente mantiene el mismo talud de 3,0H:1,0V. ZER GEOSYSTEM PERU S.A.C. (2004) indica: como un elemento adicional de refuerzo, la empresa minera ordenó construir el contrafuerte del material de préstamo en el pie del talud del dique principal.

ZER Geosystem Perú S.A.C. (2010a, b) ratifica: para la evaluación del depósito de relaves de flotación se están asumiendo los parámetros de resistencia de los materiales que conforman el depósito de relaves de flotación.

En efecto, para el análisis de estabilidad física del depósito de relaves San Andrés, por parte de TECNOLOGÍA XXI S.A., se están considerando los parámetros de resistencia (Tabla 1) de ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C.

Tabla 1. Parámetros de resistencia de los materiales utilizados en los análisis de estabilidad del Depósito de Relaves de Flotación

Material	Comportamiento	Peso Unitario Natural (Kn/m ³)	Cohesión, c(kPa)	Angulo de Fricción (φ°)
Relave Grueso	Drenado	18,5	0	32
Relave Fino	Parcialmente Drenado	17,5	0	20
Material de préstamo dique de arranque	Drenado	21	0	34
Material de contrafuerte pie del depósito	Drenado	20	0	38
Suelo de cimentación	Drenado	18,5	15	32
Roca	No Drenado	22	30	38

En la Tabla 2 se presentan los valores de los factores de seguridad mínimos requeridos de acuerdo con los criterios del Cuerpo de Ingenieros de los EE.UU. (U.S. Army Corps of Engineers-USACE 2003) y del Ministerio de Energía y Minas (SVS INGENIEROS S.A.C. 2009).

Tabla 2. Factores de seguridad mínimos admisibles

Condición	Factor de Seguridad Mínimo (FS)	
	USACE	MEM
Estática	1,5	1,5
Pseudo-estática	1,0	1,2*

Nota: * Sismo máximo con periodo de retorno de 100 años

Se analizó una sección de diseño del depósito de relaves de flotación, que corresponde a la progresiva 0+160, en actual crecimiento en la cota 3 935,10 m sobre el NMM.

Para determinar la estabilidad global y local de los taludes del depósito de relaves de flotación, tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas, se aplicaron los métodos de Equilibrio Límite disponibles en el programa SLIDE 5 (Rocscience). Se evaluaron los métodos Bishop simplificado, Janbu Simplificado y Spencer; siendo determinante para la evaluación de la estabilidad física el método Spencer, que satisface en forma rigurosa las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para cualquier forma de superficie de falla.

En resumen, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3, en tanto que en la Figura 4 se tiene como resultado el factor de seguridad en condición pseudo-estática (TECNOLOGÍA XXI S.A. 2011).

Tabla 3. Resultados del análisis de Estabilidad Física del Depósito de Relaves de Flotación

Sección de análisis	Factor de Seguridad (FS)	
	Estática	Pseudo-estática
Sección 0+160	1,796	1,340* 1,218 **

* Para coeficiente sísmico de 0,11 (periodo de retorno de 150 años)

** Para coeficiente sísmico de 0,15 (periodo de retorno de 475 años)

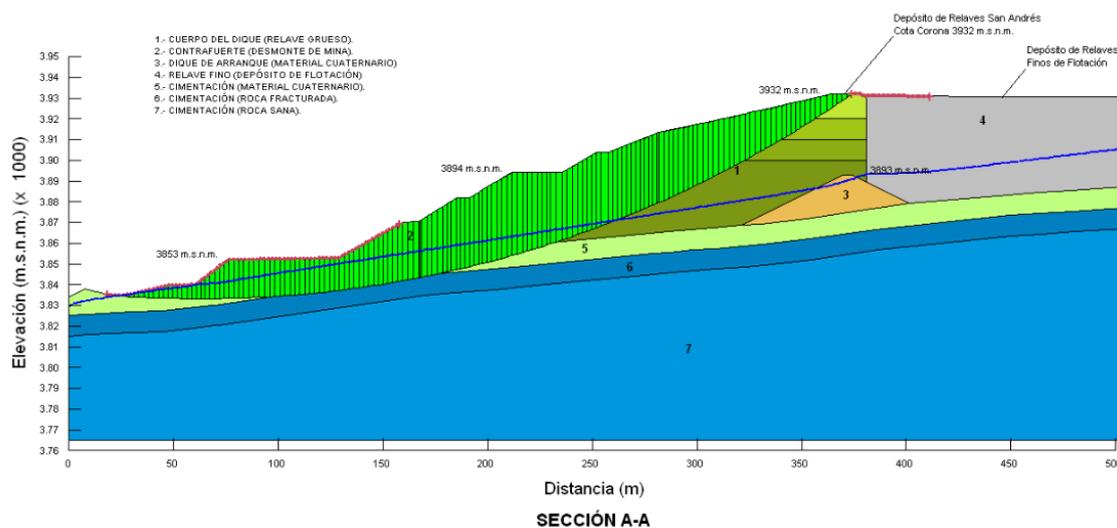


Figura 4. Análisis de estabilidad física (condición pseudo-estática) para el depósito de relaves finos de flotación.

Los resultados de los factores de seguridad obtenidos para el depósito de relaves de flotación son todos mayores que los factores de seguridad mínimos requeridos por la legislación vigente, lo que permite concluir que tanto para condiciones estáticas como pseudo-estáticas dicha estructura es físicamente estable.

3.2. Evaluación en la condición actual del depósito de relaves de cianuración (Nivel de Cresta: 3 935,10 m sobre el NMM)

Los relaves producto del proceso de cianuración son almacenados en las Pozas de Cianuración N° 3 y N° 4. El dique del depósito de cianuración está conformado por desmonte de mina, con taludes internos de 1,5H:1V y taludes externos de 2H:1V; tiene una longitud en su cresta de 360 m, un ancho de corona por el lado este de 17 m, por el lado norte de 7 m y por el lado oeste comparte dicha estructura con el dique principal del depósito de relaves de flotación.

La superficie interior de las pozas de cianuración ha sido recubierta con geomembrana de polietileno HDPE de 1,5 mm de espesor, con el fin de evitar filtraciones, y toda el agua decantada es recirculada al proceso de la Planta de Beneficio. Exteriormente, el dique se encuentra confinado por los relaves del depósito de relaves de flotación.

En la Tabla 4 se sustentan los parámetros de resistencia de los materiales involucrados en la estabilidad física del depósito de relaves de cianuración (ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C. 2010a,b).

Tabla 4. Materiales analizados bajo criterio No Lineal Elástico Hiperbólico

Parámetros --- No Lineal Elástico Hiperbólico								
Material	Γ (KN/m ³)	Γ sat (KN/m ³)	Rf	C (KPa)	Φ	μ	Es (Pa)	K (m/s)
Relave Grueso	18,0	20,0	0,74	0,0	30,0	0,36	5,69E+04	1E-06
Relave fino de Flotación Nuevo	17,0	18,0	0,68	0,0	20,0	0,40	4,84E+03	5E-05
Relave fino de Flotación Antiguo	17,0	18,0	0,68	0,0	25,0	0,40	1,00E+04	1E-05
Relave fino de Cianuración	20,0	24,0	0,68	10,0	25,0	0,40	2,00E+04	--
Material Cuaternario	18,0	20,0	0,64	29,43	32,0	0,35	1,50E+05	2E-04
Banqueta	20,0	22,0	0,78	0,0	34,0	0,35	8,50E+04	--

Al igual que en el análisis del depósito de relaves de flotación, para el análisis pseudo-estático del depósito de relaves de cianuración se utilizó un coeficiente sísmico de 0,15, para un sismo con periodo de retorno de 475 años (sismo de cierre); en tanto que para la etapa de operación se usó un coeficiente sísmico de 0,11 para un sismo con 150 años de periodo de retorno.

Para el análisis de estabilidad física del depósito de relaves de cianuración, tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas, se aplicó la metodología de Equilibrio Límite (método de Spencer); para dicho propósito se utilizó el programa de computo SLIDE 5 (Rocscience).

Se analizó la sección de diseño B-B, esta evaluación se efectuó para la situación actual (con nivel de cresta a la cota 3 935,10 m sobre el NMM). El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 5, en tanto que en la Figura 5 se tiene como resultado el factor de seguridad en condición pseudo-estática (TECNOLOGÍA XXI S.A. 2011).

Tabla 5. Resultados del análisis de Estabilidad Física del Depósito de Relaves de Cianuración

Sección de Análisis	Factor de Seguridad (FS)	
	Estática	Pseudo-estática
Condición Actual (Nivel de Cresta: 3 935,10 m sobre el NMM)	1,79	1,29*
		1,15**

* Para coeficiente sísmico de 0,11 (periodo de retorno de 150 años)

** Para coeficiente sísmico de 0,15 (periodo de retorno de 475 años)

Los resultados de los factores de seguridad obtenidos para el depósito de relaves de cianuración son todos mayores que los factores de seguridad mínimos requeridos por la legislación vigente; lo que permite concluir que tanto para condiciones estáticas como pseudo-estáticas dicha estructura es físicamente estable.

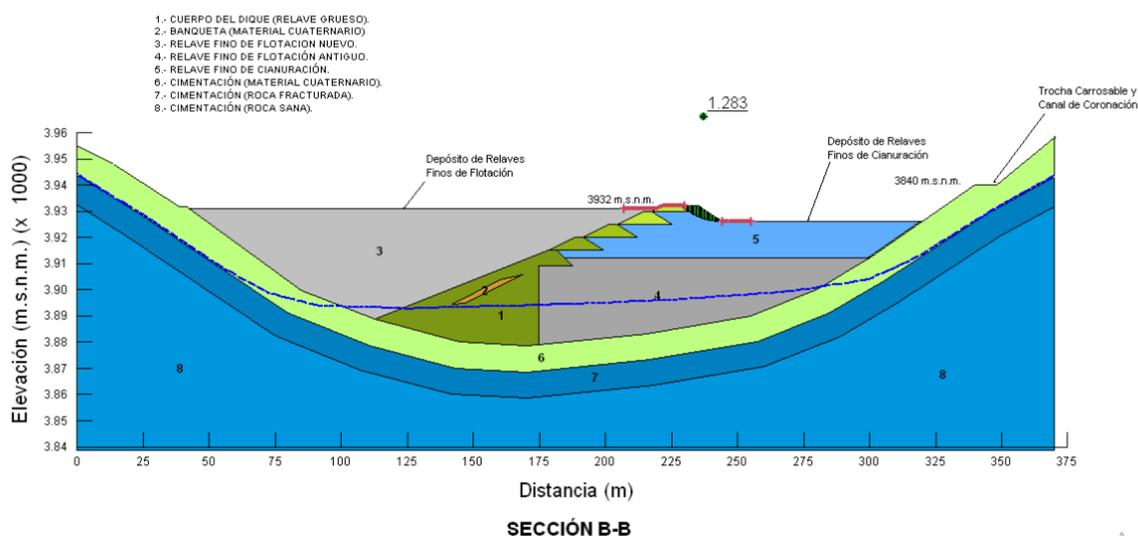


Figura 5. Análisis de estabilidad física (condición pseudo-estática) para el depósito de relaves finos de cianuración.

4. DISCUSIÓN

La ubicación del nivel freático es fundamental como factor desencadenante de muchos deslizamientos de taludes (Rodríguez 2007). La aproximación del nivel freático al talud del dique principal puede ocurrir por:

1. *Elevación del nivel de espejo de agua de los relaves por aportes de agua de crecidas o lluvias persistentes o por obstrucción de las tuberías de evacuación.* El espejo de agua de los relaves de flotación está ubicada en la cola del mismo depósito; en la base del depósito de relaves integrado San Andrés se encuentra instalado un conducto de drenaje principal (tubo

ARMCO), cuya longitud de drenaje es de 800 m, que capta las aguas en situaciones extremas a través de los tubos tipo quena. Se ha medido el nivel freático en los piezómetros de tubo abierto tipo Casagrande N° 2, 3 y 4, estos tubos están ubicados en el talud aguas abajo del dique principal, todos los pozos se encuentran secos.

2. *Por infiltración de agua de lluvia.* No se tienen relaves finos en la conformación del dique principal de San Andrés, lo que reduciría 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 relaves finos con el correspondiente descenso de la estabilidad del talud.
3. *Por operación inadecuada del depósito (mal manejo del vertimiento), provocando que el espejo de agua se aproxime al dique principal.* Para segregar los relaves de flotación se tiene instalado un hidrociclón en la corona del dique principal; los relaves gruesos se disponen para el crecimiento del dique principal mediante el método de "línea central", mientras que los relaves finos son enviados hacia el pondaje del depósito de relaves de flotación.
4. *Presencia de mantos de relave fino que provoquen la ocurrencia de niveles freáticos colgados.* No se admiten los relaves finos dentro de los relaves gruesos, los relaves gruesos se extienden y compactan en capas de 30 cm mediante la acción de un rodillo liso vibratorio.

5. CONCLUSIONES

- En la evaluación de la estabilidad física del depósito de relaves se ha tomado en cuenta su localización, del que dependen detalles como la geodinámica externa, los que afectan al depósito, o las características climatológicas y sísmicas.
- Los depósitos de relaves en operación son instalaciones dinámicas, crecen en extensión, volumen y altura en relación al tiempo; vienen a constituir pasivos ambientales, ya que permanecen tras el cierre de la actividad.
- Los parámetros físico-mecánicos de los materiales involucrados en el análisis de estabilidad física a cargo de Tecnología XXI S.A. son analizados a partir de la información existente y desarrollados en el análisis de estabilidad e ingeniería para el recrecimiento del Depósito de Relaves San Andrés, efectuada por ZER Geosystem Perú S.A.C. (2010).

- Los análisis de estabilidad de taludes son realizados tanto para las condiciones estáticas como pseudoestáticas; para este último caso se utiliza un coeficiente sísmico de 0,15, para un sismo con periodo de retorno de 475 años (sismo de cierre). En tanto que para la etapa de operación se usa un coeficiente sísmico de 0,11 para un sismo con 150 años de periodo de retorno.
- Los resultados del análisis de estabilidad física global indican que el Depósito Integrado de Relaves San Andrés presenta apropiada condición de estabilidad física para las condiciones actuales, a una cota de 3 935,10 m sobre el NMM en la corona del dique principal. Con una elevación de 4,90 m se estará llegando a la cota corona de 3 940 m sobre el NMM, altitud hasta donde tiene la autorización para su recrecimiento.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos para los depósitos de relaves de flotación y de cianuración, tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas, poseen valores mayores a los factores de seguridad mínimos requeridos por la legislación vigente. Se concluye que ambas estructuras son físicamente estables.

6. REFERENCIAS

- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). 1997: Reporte de Estabilidad Física de los Depósitos de Flotación y Cianuración. Lima.
- Equipo Programa Tranque, Fundación Chile. 2018: Avances y Retos para la Gestión de los Depósitos de Relaves en Chile. ISBN: 978-956-8200-46-6. Consulta: 19/07/2019. Disponible en: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2018/11/TRANQUE-2018-1.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas. 2018: Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. D.S. N° 024-2016-EM. Lima, Perú. Consulta: 10/08/2019. Disponible en: <https://es.slideshare.net/JoseildeDuque/reglamento-de-seguridad-y-salud-ocupacional-en-minera>
- Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2007: Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. Ingeniería Civil, 9: 148-181. Consulta: 17/08/2019. Disponible en: http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/2007_148_181.pdf
- Oldecop, L.; Zabala, F.; Pacheco, R. R. y Libardi, L. G. 2008: Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros. In: V Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. At Tucumán, Argentina.

- Peters, G.; Verdugo, R.; Echevarría, J. y Caro, G. 2014: Estudio geotécnico para el emplazamiento de un depósito de relaves espesados sobre uno convencional existente. En: VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. 26-28 noviembre, Chile. Consulta: 18/08/2019. Disponible en: <http://cmgi.cl/publicaciones-web/peters/estudio%20geotecnico%20para%20el%20emplazamiento%20de%20un%20deposito%20de%20relaves%20espesados%20sobre%20uno%20convencional%20existente.pdf>
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2018: Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes. Valparaíso. Consulta: 22/08/2019. Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/GUIA-METODOLOGICA.pdf>
- Rennat, E. A. 1997: Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina. Lima: Ministerio de Energía y Minas. Consulta: 10/08/2019. Disponible en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guiaestabilidad.pdf>
- SVS Ingenieros S.A.C. 2009: Evaluación de la Estabilidad Física del Dique Principal y de los Depósitos de Relaves de Cianuración San Andrés. Lima.
- Tecnología XXI S.A. 2011: Evaluación de la Estabilidad Física y Química de los Depósitos Operativos UEA Retamas. Lima.
- Tovar-Pacheco, J. A. 2015: El agua subterránea en el medio ambiente minero y su importancia en los planes de cierre. Consulta: 26/07/2019. Disponible en: http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso_cierreminas/02_T%C3%A9cnico/02_Hidrolog%C3%ADa/TechHidro-L2_Aguas%20Subterr%C3%A1neas.pdf
- U.S. Army Corps of Engineers-USACE. 2003: Slope Stability, EM 110-2-1902, Engineering Manual. Washington, DC. Consulta: 10/08/2019. Disponible en: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1902.pdf?ver=2014-05-07-083439-823
- ZER Geosystem Perú S.A.C. 2004: Contrafuerte de Desmonte de Mina. Lima.
- ZER Geosystem Perú S.A.C. 2009: Modelamiento Numérico del Conducto de Drenaje Principal del Depósito de Relaves San Andrés. Lima.
- ZER Geosystem Perú S.A.C. 2010a: Análisis de Estabilidad e Ingeniería para el Recrecimiento del Depósito de Relaves San Andrés. Lima.
- ZER Geosystem Perú S.A.C. 2010b: Estudio de Peligro Sísmico para el Recrecimiento del Depósito de Relaves San Andrés. Lima.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Ambos autores contribuyeron por igual

ORCID

PJAP, <https://orcid.org/0000-0002-2587-8122>

CJAC,

Recibido: 02/09/2019

Aceptado: 29/11/2019