



Avances en la definición de un índice de estabilidad física para depósitos de relaves

Meili Carvajal ⁽¹⁾; César Pastén ^(1,2), Felipe Campos ⁽²⁾; Christian Ihle ⁽²⁾; Diana Comte ⁽²⁾; José Campaña ⁽³⁾; Jorge Troncoso ⁽⁴⁾; Sebastián Jara ⁽⁵⁾; Ángela Oblasser ⁽⁵⁾

- (1) *Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*
(2) *Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), Universidad de Chile*
(3) *Arcadis, Chile*
(4) *BGC Ingeniería, Chile*
(5) *Fundación Chile*
meili.carvajal@gmail.com

Resumen

Este trabajo reporta el avance en la definición de un índice de estabilidad física para depósitos de relaves, que considera los mecanismos de falla de inestabilidad de taludes, erosión interna y rebalse. El índice está compuesto por tres módulos con distintos niveles de complejidad. El primer módulo es una evaluación cualitativa del estado del depósito, que considera su vulnerabilidad, desviaciones con respecto al diseño y la ocurrencia de eventos gatilladores de falla. El segundo módulo verifica los parámetros críticos para la estabilidad con respecto a rangos y umbrales de aceptabilidad a través de sistemas de instrumentación y monitoreo. Además, este módulo evalúa los principales escenarios de falla asociados a la combinación de valores de los parámetros críticos para cada mecanismo de falla. Con la evaluación conjunta del primer y segundo módulo, se comunica externamente el estado del funcionamiento del depósito. Por último, el tercer módulo corresponde a la evaluación de índice de estabilidad física propiamente tal, a través de árboles de falla para cada mecanismo de falla, siendo ésta una herramienta integradora y predictiva que se alimenta de información de los módulos uno y dos y que se utiliza como una herramienta de gestión interna del depósito.

Palabras-Clave: *Relaves, Estabilidad física, árbol de falla*

Abstract

This paper reports the progress in the definition of a physical stability index for tailings deposits, which considers slope instability, internal erosion and overtopping as failure mechanisms. The index is composed of three modules with different levels of complexity. The first module is a qualitative evaluation of the state of the deposit, which considers its vulnerability, deviations with respect to the design and the presence of fault trigger events. The second module verifies the critical parameters for stability, with respect to acceptability ranges and thresholds, through instrumentation and monitoring systems. In addition, this module evaluates the main failure scenarios associated with the combination of critical parameters values for each failure mechanism. With the evaluation of the first and second modules, the operation status of the deposit is externally communicated. Finally, the third module corresponds to the assessment of physical stability index itself, through fault trees analysis for each failure mechanism, being an integrative and predictive tool that feeds information from modules one and two.

Keywords: *Tailings, Physical stability, fault tree.*



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

1 Introducción

La sostenida demanda de cobre ha elevado considerablemente los niveles de producción de mineral, lo que sumado a una disminución en las leyes se traduce en un aumento del volumen de desechos del proceso productivo [1]. Este aumento genera la necesidad de construir grandes depósitos de relaves capaces de contener volúmenes del orden de miles de millones de metros cúbicos, lo que conlleva a grandes consecuencias en caso de ocurrir una falla, como las ocurridas en Mount Polley, Canadá [2], y Samarco, Brasil [3].

Existen numerosas iniciativas y guías de buenas prácticas para mejorar el diseño, la construcción y la operación de depósitos de relaves, tanto a nivel internacional [4] como en Chile [5]. Una de estas iniciativas es el Programa Tranque, que busca desarrollar un sistema de monitoreo en línea de depósitos de relaves para transmitir, procesar y desplegar de manera actualizada y de fácil entendimiento, indicadores de desempeño de su estabilidad física y química [1,6]. En el marco de este Programa, el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC) está desarrollando un índice que permitirá monitorear la estabilidad física de los depósitos de relaves. Este índice será parte de un sistema global de monitoreo que utilizará las mejores tecnologías e innovadores mecanismos de análisis de las variables, para fortalecer la operación y proporcionar información confiable y oportuna, tanto a las comunidades, como a las autoridades competentes. En este trabajo, se propone un índice de estabilidad física que se calcula en tres etapas, cada una más compleja que la anterior, se identifican los principales mecanismos de falla, los parámetros críticos y los modelos que permiten una evaluación integral de la estabilidad física. También, en este trabajo se propone la comunicación del desempeño de los depósitos para responder ante situaciones que comprometen la estabilidad física.

2 Mecanismos de Falla

En el marco de este proyecto, se define un mecanismo de falla como aquel proceso o secuencia de procesos gatillados por un evento particular, que resulta en una inestabilidad del depósito y la pérdida de almacenamiento de relaves. Distintos autores han revisado fallas históricas de depósitos de relaves, clasificándolas según tipo de falla, consecuencias (por ejemplo, personas afectadas y volumen liberado), tipos de depósitos, métodos constructivos, entre otras características [7-9]. Respecto a los tipos de falla identificados, las más comunes corresponden a inestabilidad de taludes estática y sísmica, licuación del muro resistente, rebalse y vaciamiento, deformaciones excesivas del muro resistente, erosión interna del muro resistente, inestabilidad del suelo de fundación, y erosión del muro resistente por efecto hídrico. De esta revisión, sumado a lo establecido por la Comisión Europea [10], la definición del índice de estabilidad física adoptada en este trabajo considera los mecanismos de falla de inestabilidad de taludes, rebalse y erosión interna. Es importante mencionar que todos los tipos de falla mencionados más arriba se verifican en alguno de los tres mecanismos de falla. Por ejemplo, licuación estática y movilidad cíclica se evalúan dentro de escenarios de falla asociados a inestabilidad de taludes.



SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA
CHILEAN GEOTECHNICAL SOCIETY

Inestabilidad de Taludes:

Este mecanismo de falla se caracteriza por un deslizamiento importante del volumen del muro de contención debido a que, en términos generales, las fuerzas solicitantes son mayores a las fuerzas resistentes. Los resultados pueden ser desplazamientos y deformaciones importantes del muro que pueden comprometer la contención de los relaves. Se pueden identificar tres principales formas de falla: falla en la fundación del muro, falla de las laderas cercanas al muro y falla del muro mismo. El colapso sólo ocurre cuando la deformación es lo suficientemente grande para que se produzca un deslizamiento importante de material, comprometiendo la contención de los relaves, y la integridad estructural y operativa. Dado lo anterior, los factores más relevantes para este mecanismo de falla son principalmente deformaciones y sus posibles evidencias (por ejemplo, grietas y socavones), y el aumento en las presiones de poros medidas en el depósito.

Rebalse:

El rebalse se produce cuando el volumen de relave o agua de entrada al depósito excede la capacidad de manejo del embalse. Durante el rebalse se genera una erosión importante en el muro de contención que produce una falla progresiva, lo que puede resultar en la formación de una brecha y el colapso del muro. Las características del depósito juegan un rol determinante en este mecanismo de falla, las cuales se pueden acotar a los siguientes parámetros críticos: altura de la revancha, el largo de la playa y el área y volumen de la laguna aguas claras en el depósito. El rebalse se puede originar por diversos eventos como lluvias intensas, asentamientos del muro, sismos y fuertes vientos que induzcan olas y deslizamiento en el área de aguas arriba del tranque. Otros eventos de carácter operacional que pueden generar este mecanismo de falla consideran fallas en los canales perimetrales y el bloqueo del vertedero de emergencia.

Erosión Interna:

Corresponde a la migración de material a través del muro de contención, permitiendo la formación de un conducto que facilita la circulación de agua y/o relave a través de la estructura. La cavidad resultante favorece el progreso de la erosión, lo que puede generar una falla local o global del depósito o de su suelo de fundación. El proceso de erosión interna puede ser dividido en cuatro fases: iniciación, continuación, progresión y falla [11]. Ésta última puede ser desde una gran ampliación del agujero formado en el proceso de erosión, hasta asentamientos del coronamiento del muro. Además, pueden gatillarse otros mecanismos de falla, como un rebalse del depósito, desintegración de talud aguas abajo, o inestabilidad del talud aguas abajo. Los principales tipos de erosión interna son erosión de contacto, erosión retrógrada, sufusión y flujo concentrado [12]. Los principales factores que condicionan la generación de erosión interna son el gradiente hidráulico del flujo, la susceptibilidad de los materiales y la presencia de vías preferenciales de flujo.

3 Definición del Índice de Estabilidad Física

El Índice de Estabilidad Física (IEF) corresponde a la combinación de IEF individuales asociados a los mecanismos de falla de inestabilidad de taludes, erosión interna y rebalse. Dependiendo de los valores de los índices de cada mecanismo de falla, el nivel de estabilidad de un depósito de relaves

puede ser alto, medio o bajo. La Fig. 1 muestra la estructura conceptual del IEF. El cálculo del IEF considera tanto la situación actual del depósito, como su historia y tendencias, además de incorporar elementos de amenaza y vulnerabilidad. Además, el índice es lo suficientemente general para incluir todo tipo de depósitos (por ejemplo, convencionales, espesados, filtrados y en pasta) en distintas etapas de su vida útil, si se cuenta con la información adecuada para su evaluación. Como se observa en la Fig. 1, el cálculo del IEF se divide en tres módulos, los que se explican a continuación.

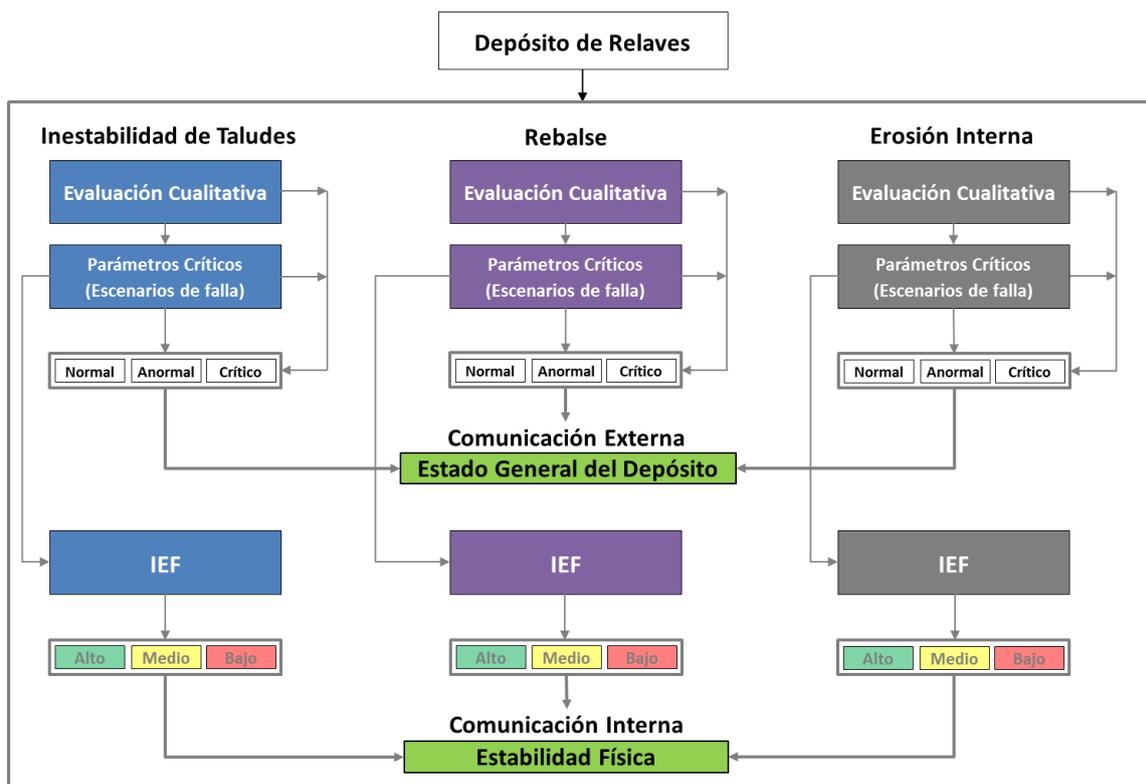


Fig. 1 – Estructura del índice de Estabilidad Física (IEF) de un depósito de relaves.

Módulo 1 – Evaluación Cualitativa:

A través de este módulo se revisa periódicamente el estado del depósito. Esta revisión se hace en tres etapas: evaluación de vulnerabilidad, verificación de factores agravantes y asignación de protocolos. La definición de este módulo se basa en normativa y guías nacionales [5,13,14] y documentación internacional [15-18]. La etapa de evaluación de vulnerabilidad revisa distintas condiciones del depósito y asigna puntaje en función de su estado, cuya suma da cuenta del nivel de vulnerabilidad del depósito. Luego, se verifica la presencia factores agravantes asociados al cumplimiento de las condiciones de diseño y a la ocurrencia de eventos gatilladores de los mecanismos de falla. Un evento gatillador es un agente, fenómeno o intervención que afecta la estabilidad de un depósito de relaves. Finalmente, a partir de los resultados de la evaluación



cuantitativa se pueden activar protocolos generales de acción dependiendo de las condiciones del depósito. Se recomienda que este módulo se evalúe semanalmente.

Módulo 2 – Verificación de Parámetros Críticos:

Se define parámetro crítico como una propiedad cuantificable en un depósito de relaves, que individualmente o de manera combinada con otros parámetros, puede afectar la estabilidad física del depósito. Los parámetros críticos pueden ser medidos de forma puntual, global, o en direcciones longitudinal o transversal al muro, por medio de inspección visual o instrumentación. Parte de estos parámetros se pueden monitorear en línea, como desplazamientos y presiones de poros, o a partir de variables que deben actualizarse manualmente por el responsable a cargo del depósito. Para la evaluación de este módulo, se definieron 30 parámetros críticos presentados en la Tabla 1, junto a su instrumentación o sistema de monitoreo y frecuencia de medición recomendadas. Si los parámetros críticos no cumplen con los rangos de aceptabilidad (valores que se deben definir de forma sitio-específica), se activan protocolos operacionales. Posterior a la evaluación de los parámetros críticos y sus tendencias, se procede a la evaluación de los escenarios de falla más comunes, que se definen a partir de combinaciones de parámetros críticos para cada mecanismo de falla. En caso de que se cumplan los criterios de algún escenario, se activan también protocolos asociados. Actualmente, el IEF define 7 escenarios de inestabilidad de taludes, 3 de erosión interna y 3 de rebalse. Se entiende que algunos parámetros críticos no aplican para ciertos tipos de depósitos, dependiendo principalmente del tipo de relave almacenado. En tal caso, el parámetro se elimina de la lista en el momento de la implementación del índice.

De acuerdo con los resultados de la evaluación de los módulos 1 y 2, se comunica externamente el estado general del depósito utilizando la convención de la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) del Ministerio del Interior. Las categorías en las que el depósito puede encontrarse son tres y se activan de acuerdo con los protocolos activos en los distintos módulos del IEF. En una situación normal donde no existen protocolos activos se informa externamente una situación de “alerta temprana preventiva” que indica que existe un monitoreo constante del depósito pero que no se han detectado problemas en éste. Por otra parte, para una situación en la que se han activado protocolos en el módulo 2, se informa una comunicación externa de categoría “alerta amarilla”, que da cuenta de que existe algún problema en el depósito y que se están tomando medidas para mitigarlo. Finalmente, si ocurre una combinación de problemas que pone en peligro inminente la estabilidad de depósito, se comunica una “alerta roja” que inicia inmediatamente los protocolos de evacuación.

Tabla 1 – Listado de parámetros críticos a monitorear por el IEF

Parámetros [unidad]	Grupo	Instrumento de medición	Frecuencia de Medición
Altura del muro [m.s.n.m.]	Aspectos geométricos	Prismas/Monolitos (Topografía)	Cada 15 días
Ancho de coronamiento [m]	Aspectos geométricos	Prismas/Monolitos (Topografía)	Cada 15 días
Pendiente del muro [H:V]	Aspectos geométricos	Levantamiento topográfico	Cada 15 días

Pendiente de la playa [%]	Aspectos geométricos	Topografía	Cada 15 días
Distancia mínima al muro [m] /área [m ²] laguna de aguas claras	Aspectos geométricos	Batimetría y topografía	Trimestral
Deformación del suelo de fundación [dm]	Deformación del depósito	Inclinómetro	Semanal
Desplazamiento y deformación del muro [dm]	Deformación del depósito	Monolitos e inclinómetros	Operación normal: Semanal
Deformación del coronamiento [cm]	Deformación del depósito	Monolitos e inclinómetros	Operación normal: Semanal
Presencia de grietas en el muro [Si/No]	Aspectos de integridad externa	Cámaras/ Dron de reconocimiento	Diario
Evidencia de humedad y/o filtraciones en talud de aguas abajo del muro [Si/No]	Aspectos de integridad externa	Cámaras/ Dron de reconocimiento	Diario
Fenómenos de subsidencia o socavación en el muro o en la cubeta cercana al muro [Si/No]	Aspectos de integridad externa	Cámaras/ Dron de reconocimiento	Diario
Integridad del estribo	Aspectos de integridad externa	Cámaras/ Dron de reconocimiento	Diario
Revanca hidráulica [m]	Aspectos operacionales	Boyas (Automático)	Operación normal: 1hr
Revanca operacional [m]	Aspectos operacionales	Topografía, prismas y regletas en talud	Diario
Volumen de relave depositado [m ³]	Aspectos operacionales	Topografía, prismas y regletas en talud	Diario
Estado operacional del vertedero [Operativo/No operativo]	Aspectos operacionales	Sistema de confirmación de operatividad (Por definir)	Diario
Nivel freático del muro y depósito [m.s.n.m.]	Aspectos operacionales	Piezómetros	Diario
Presiones de poros en el muro y suelo de fundación [m.s.n.m.]	Aspectos operacionales	Piezómetro (Automáticos)	Operación normal: 1 hr
Intensidad de lluvia [mm/hr]	Aspectos operacionales	Pluviómetro (Automático)	Durante la lluvia: 1 hr
Factor de seguridad de capacidad disponible (FSV)	Aspectos operacionales	Pronóstico (Preventivo) / Pluviómetro (Tiempo real)	Frente a un pronóstico de lluvia y durante esta
Altura de ola	Aspectos de diseño	Estudio de olas dentro del diseño	Cada 5 años
Aceleraciones sísmicas del muro [g]	Aspectos de diseño	Acelerógrafos (Automático - En línea)	Frecuencia de muestreo de 200 Hz
Densidad del muro [kg/m ³]	Aspectos de diseño	Ensayos in-situ o de laboratorio/ Ensayo SPT o similares en resultado	Cada no más de 3 años realizar una verificación mediante ensayo SPT o similar. Para ensayos in-situ, es acorde con diseño y operación
Granulometría del material del muro [%]	Aspectos de diseño	Ensayo de laboratorio	Acorde con diseño y operación
Módulos de deformación [F/L ²] y resistencia al corte [F/L ²] del muro del depósito	Aspectos de diseño	Ensayos in-situ (presiómetro y placa de carga dinámica) y de laboratorio	Ensayos in-situ: Campaña anual; Ensayos de lab: Campaña anual
Módulos de deformación [F/L ²] y resistencia [F/L ²] del suelo de fundación	Aspectos de diseño	Ensayos in-situ (presiómetro y placa de carga dinámica) y de laboratorio	-
Resistencia del material de la cubeta del muro	Aspectos de diseño	Ensayos in-situ y de laboratorio	Ensayos in-situ: Campaña anual; Ensayos de lab: Campaña anual

Cumplimiento de las características de diseño del dren [%]	Funcionalidad del sistema de drenaje	Ensayo de laboratorio acorde al diseño	Registro de construcción
Integridad del sistema de drenaje [L/s]	Funcionalidad del sistema de drenaje	Caudalímetro / Piezómetros / Fibra óptica	Caudalímetro: 1 hr / Piezómetros: 1hr / Fibra óptica: Continua
Turbiedad del agua en el sistema de drenaje [NTU]	Funcionalidad del sistema de drenaje	Turbidímetro (Automático y en línea)	Inspección visual: 1 día ; Turbidímetro: 1 hr

Módulo 3 – Cálculo del Índice de Estabilidad:

El último módulo calcula el índice de estabilidad física propiamente tal. Este módulo es una herramienta integradora y predictiva que relaciona la información de los módulos 1 y 2 a través de árboles de falla y modelos numéricos y analíticos. El índice de estabilidad física se define como una medida de la probabilidad de falla de un depósito de relaves ante alguno de los mecanismos de falla analizados. Esta probabilidad se obtiene a partir de la evaluación de árboles de falla, que es una herramienta que permite analizar de manera gráfica la generación de una situación crítica. Los árboles comienzan con una condición de falla, que en este caso corresponde a una falla ocasionada por alguno de los tres mecanismos considerados, seguida por todas las posibles cadenas de eventos que podrían conducir a esa condición, hasta llegar a eventos básicos, o raíces, los cuales no requieren de otros para su ocurrencia. Los eventos se relacionan entre sí a través de puertas o conectores lógicos, que pueden ser particularmente dos: la puerta O y la puerta Y ($\gamma=*$; $\sigma=+$) [19]. Así, el IEF se obtiene a partir de la probabilidad calculada mediante la evaluación de cada árbol de falla. Para calcularla, se asigna una probabilidad de ocurrencia a cada evento básico, y se realizan las operaciones correspondientes hasta llegar al evento no deseado con una probabilidad de ocurrencia.

De esta forma, se construye un árbol de falla para cada mecanismo en estudio, considerando las posibles causas más probables. La Fig. 2 muestra la estructura del árbol de falla por inestabilidad de talud, el cual considera la ocurrencia de una falla estática o una falla sísmica, cada una de las cuales se evalúa en función del factor de seguridad, y la presencia de suelos con mal comportamiento y su evidencia. Por otra parte, la Fig. 3 muestra el árbol de falla para el caso de rebalse. En éste se considera que la falla puede ocurrir debido a una reducción de la cota del coronamiento, un incremento de laguna, o por la ocurrencia de olas. Por último, el árbol asociado a una falla por erosión interna evalúa los cuatro tipos de erosión interna y los errores que pueden existir en su detección e intervención. Cada evento raíz tiene una probabilidad de ocurrencia que puede depender de variables monitoreadas, modelos físicos, estudios previos, ocurrencia de eventos naturales y/o presencia de instrumentos. La variación de las probabilidades de los eventos permite que el índice vaya cambiando su valor en el tiempo.

Protocolos operacionales:

Como se mencionó anteriormente, si no se cumple con los umbrales definidos en cada módulo, se activan protocolos operacionales generales que se definen de acuerdo con lo siguiente:

- Protocolo A: Asociado a problemas leves del funcionamiento del depósito que pueden ser gestionados internamente.

- Protocolo B: Asociado a problemas graves del depósito, los cuales deben ser reportados.
- Protocolo C: Asociado a una situación crítica del depósito, la que se debe informar externamente y sugerir una evacuación.

La Fig.4 muestra la secuencia de verificación de los módulos del índice y los protocolos en su funcionamiento y resultados.

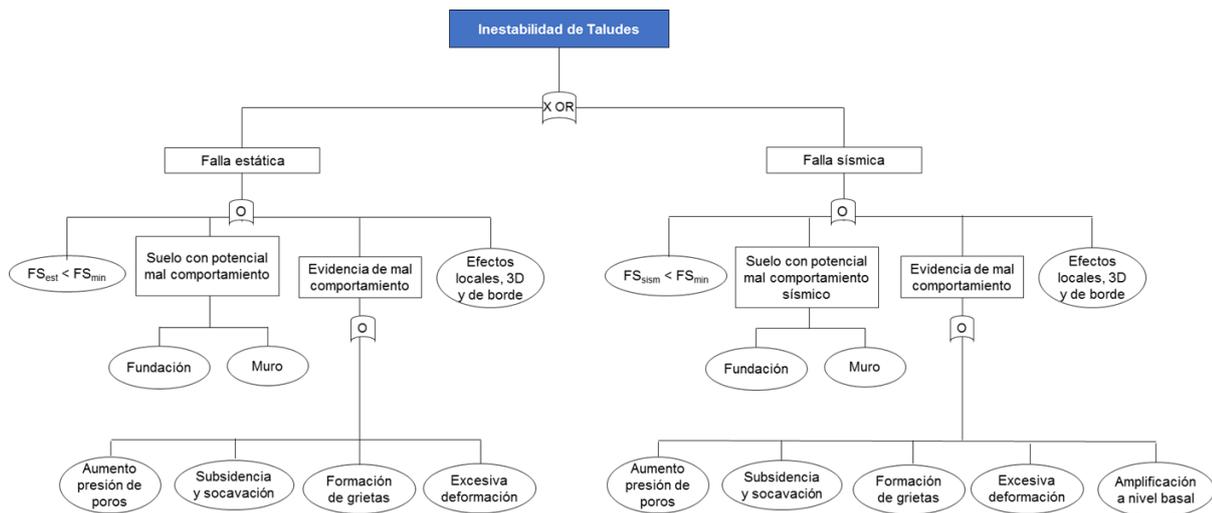


Fig. 2 – Árbol de Falla para Inestabilidad de Taludes

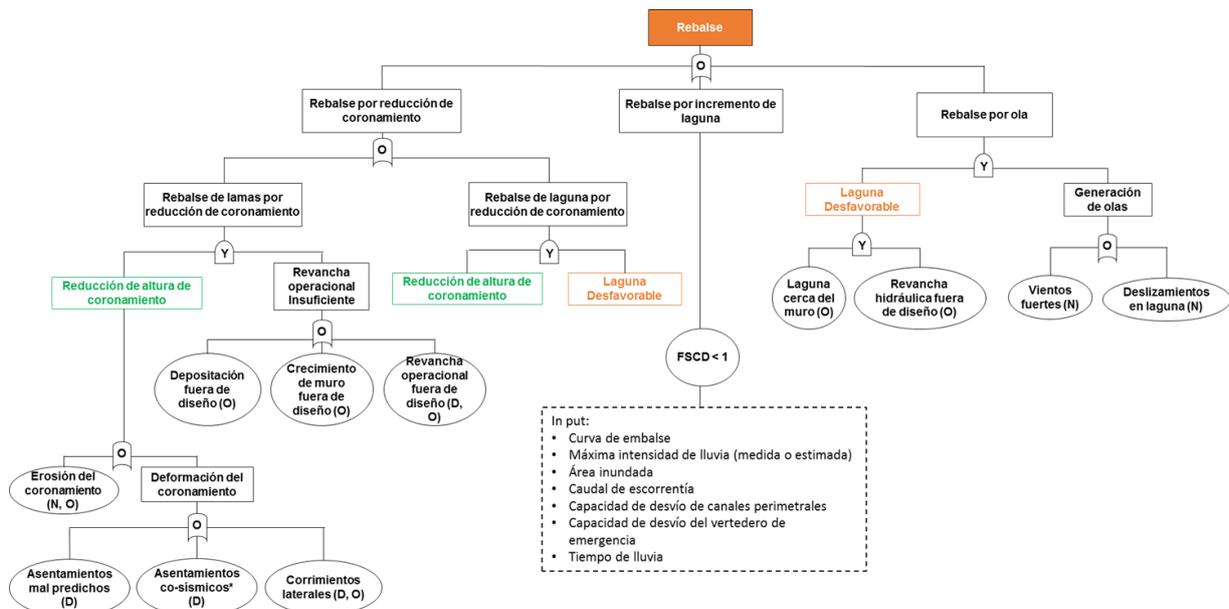


Fig. 3 – Árbol de Falla para Rebalse

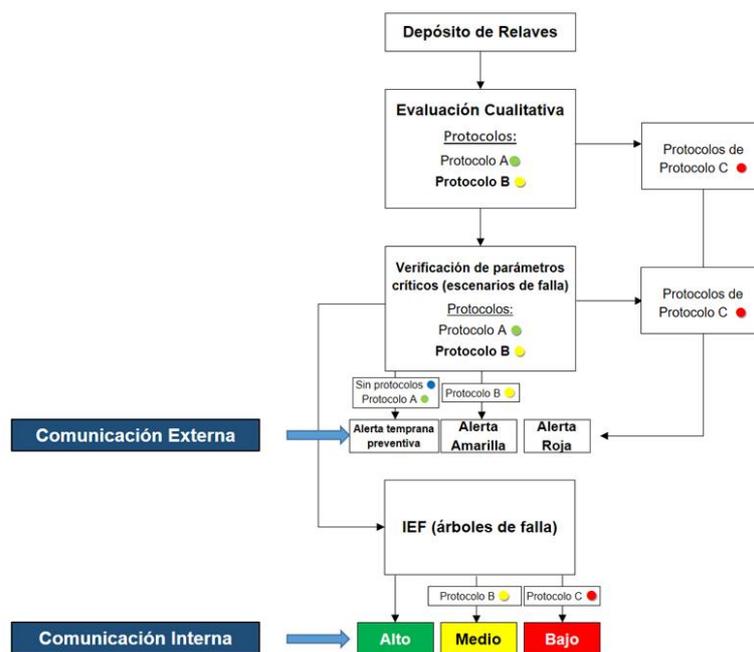


Fig. 4 – Secuencia de verificación del índice de estabilidad física para falla

4 Conclusiones y comentarios finales

El IEF está formado por tres niveles de complejidad que detectan desde situaciones evidentes (módulo 1) hasta eventos acoplados e incipientes (módulo 3), basado en la medición de los parámetros críticos y los eventos gatilladores de los mecanismos de falla de inestabilidad de taludes, erosión interna y rebalse. Si bien se consideran estos tres mecanismos de falla como los principales, la evaluación de parámetros críticos y escenarios de falla permite el estudio de otros posibles mecanismos de importancia en Chile, como, por ejemplo, movilidad cíclica. El IEF sirve como herramienta de gestión, que permite comunicar externamente el estado general del depósito a partir de los resultados de los módulos 1 y 2, e internamente el nivel de estabilidad, obtenido de la aplicación del módulo 3. La completa aplicación de esta metodología (3 módulos) dependerá del nivel de información y monitoreo de parámetros críticos con la que cuente cada depósito. Así, existirán depósitos donde sólo se podrá evaluar hasta los módulos 1 o 2, mientras que en otros la evaluación podrá ser completa. Se espera que el IEF se transforme en un referente que puede ser implementado gradualmente en sus distintos módulos por la gran, mediana y pequeña minería.

El desarrollo futuro del IEF contempla la calibración de los tres módulos, utilizando información recopilada de distintos depósitos a lo largo del país, la implementación y calibración en un depósito piloto y la integración a la plataforma central del Programa Tranque. Esta última es la que se encarga de la gestión de información, reuniéndola y operándola para la final obtención del índice de estabilidad física.



Referencias

- [1] Fundación Chile y CORFO (2015) *Hoja de Ruta de la Minería 2035*.
- [2] Chief Inspector of Mines (2015) *Mount Polley Mine Tailings storage facility breach*. British Columbia, Canada.
- [3] Morgenstern et al (2016) *Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundao Dam*. Fundao Tailings Dam Review Panel.
- [4] Golder Associates (2016) *Review of Tailings Management Guidelines and Recommendations for Improvement*. International Council on Mining and Metals.
- [5] SERNAGEOMIN (2016) *Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes*.
- [6] Fundación Chile (2017) *Programa Tranque*. Obtenido de página web: fch.cl/proyecto/sustentabilidad/tranque/
- [7] Foster et al. (2000) *A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping*. Canadian Geotechnical Journal, 39(2).
- [8] Blight, G. (2000) *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*.
- [9] Villavicencio, G et al. (2013) *Failure of sand tailings dams in a highly seismic country*. Canadian Geotechnical Journal, 51, 449-464.
- [10] European Commission (2009) *Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities*.
- [11] Fell, R. et al (2003) *Time for development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(4), 307-314.
- [12] Zhang, L. et al (2015) *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*. Primer Edición. Wiley.
- [13] Ministerio de Minería de Chile (2007) *Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves*.
- [14] Ministerio de Obras Públicas (2005) *Decreto 50*.
- [15] CDA (2007) *Dam Safety Guidelines*. Canadian Dam Association.
- [16] CDA (2016) *Technical Bulletin: Dam Safety Reviews*. Canadian Dam Association.
- [17] ICOLD (1997) *Bulletin n°45: Manual on Tailings Dams and Dumps*. International Commission on Large Dams.
- [18] ICOLD (2016) *Bulletin n°148: Small Dams, Design, Surveillance and Rehabilitation*. International Commission on Large Dams.
- [19] Taguchi (2014) *Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management – a Framework*. University of British Columbia.