

Influencia de la interfaz en la estabilidad de un patio de lixiviación: un análisis de sensibilidad

Influence of the interface on the stability of a heap leach pad: a sensitivity analysis

Wendy ROMERO¹ y Jorge MENDOZA²

¹ Knight Piésold, México

² Knight Piésold, USA

INFORMACIÓN

Palabras clave:

- Patio de lixiviación
- Interfaz geosintética
- Geomembrana
- Estabilidad de taludes
- Análisis de sensibilidad

RESUMEN

La estabilidad física de un patio de lixiviación (Heap Leach Facility, HLF, por sus siglas en inglés) está generalmente gobernada por el comportamiento de la “interfaz” del sistema de revestimiento con geomembrana, destinado a minimizar las filtraciones. En este trabajo se entiende “interfaz” al sistema de geomembrana con la secuencia: *soil liner* (suelo de baja permeabilidad), geomembrana y mineral o capa drenante (*overliner*). Debido a la composición propia de la interfaz es crucial caracterizar su comportamiento mediante un correcto muestreo y pruebas de laboratorio adecuadas. Este artículo presenta un análisis de sensibilidad de la interfaz en la estabilidad de un HLF en etapa de cierre, basado en resultados de ensayos obtenidos tanto durante el diseño. En el análisis se consideraron como parámetros fijos las propiedades del mineral, del *overliner*, las del terreno natural y la geometría del HLF. Los resultados muestran el efecto del sistema de interfaz sobre la estabilidad global del HLF, cuantificado mediante los factores de seguridad.

ABSTRACT

The physical stability of a heap leach facility (HLF) is generally governed by the behavior of the geomembrane liner system “interface,” intended to minimize seepage. In this work, “interface” refers to the geomembrane system comprising the sequence: soil liner (low-permeability soil), geomembrane, and ore or drainage layer (*overliner*). Due to the specific composition of the interface, it is crucial to characterize its behavior through proper sampling and appropriate laboratory testing. This article presents a sensitivity analysis of the interface in the stability of an HLF during the closure phase, based on test results obtained during design. In the analysis, the properties of the ore, the *overliner*, the natural ground, and the HLF geometry were treated as fixed parameters. The results show the effect of the interface system on the overall stability of the HLF, quantified by factors of safety.

1 INTRODUCCIÓN

Los patios de lixiviación son estructuras geotécnicas de gran escala donde el control del flujo, la estabilidad de taludes y la integridad del sistema de contención son esenciales para la seguridad y el desempeño ambiental (Barreda y Chahua, 2014). Los modos de falla observados en la práctica frecuentemente movilizan superficies críticas a lo largo de interfaces geomembrana-suelo de baja permeabilidad, geomembrana-mineral o geomembrana-capa drenante, sobre todo cuando existen arrugas,

perforaciones, lubricación por soluciones de proceso o drenajes insuficientes. Este trabajo se centra en cuantificar la influencia de dichas interfaces en la estabilidad de un HLF mediante un análisis de sensibilidad que integra la variación de los parámetros de resistencia. El análisis se realiza mediante el software GeoStudio 2D en su módulo SLOPE W.

1.1 Objetivos

- Determinar la contribución relativa de los parámetros de interfaz al factor de seguridad (FS) y a la probabilidad de falla.
- Identificar los parámetros críticos para la falla

2 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

El HLF fue construido en tres fases, la Fase 1 contempla la Pila 1 mientras que las Fases 2 y 3 contemplan la Pila 2. A partir de febrero del 2017 se concluyó la depositación de mineral en el HLF, por lo que desde esa fecha las pilas se encuentran en proceso de enjuague.

Las pilas tienen un talud global con relación 3H:1V, conformada con el apilamiento del mineral a medida que se fueron conformando las plataformas de lixiviación. En la zona aguas abajo de la Fase 1 se ubican las piletas de contingencia, la pileta de solución rica y el área de planta de proceso.

Durante la operación de la Fase 1 el área activa de lixiviación fue 104,000 m² y durante la Fase 2 el área activa de lixiviación fue 96,000 m². El apilamiento del mineral se realizó en capas de 8 metros de espesor alcanzando alturas totales entre 50 y 75 metros. La relación de talud de cada plataforma se diseñó y construyó con relación de 1.5H:1V.

A continuación, se mencionan las estructuras que conforman el HLF.

2.1 Componentes de la base de la pila

- Fundación (terreno natural): Predominan las rocas ígneas del tipo flujo de ceniza (*Ash Flow*), brecha andesítica, andesita y toba lítica.
- Material de relleno: Colocado en zonas topográficamente bajas para cumplir con la configuración de diseño y conformado en capas compactadas.
- Sistema de drenaje subterráneo: instalado en puntos bajos de la topografía (es decir, el fondo del valle) y en áreas adicionales donde se identificaron filtraciones durante el proceso constructivo. Su función principal es capturar y conducir aguas subterráneas superficiales o agua de escorrentía hacia la zona aguas abajo. El sistema está conformado por tuberías perforadas protegido con material granular de drenaje.
- Subrasante preparada: Conformada con materiales escarificados in situ a una profundidad mínima de 30 cm, acondicionada compactados con humedad óptima.

2.3 Revestimiento compuesto

- Revestimiento de suelo de baja permeabilidad (*soil liner*): Conformado con una capa de material

compactado de 30 cm de espesor y suelo de baja conductividad hidráulica.

- Revestimiento con geomembrana (*liner*): La mayor parte de la superficie fue revestida con geomembrana de polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) de 1.5 mm de espesor (60 mils), lisa en ambos lados de la cara. La base de la zona occidental y la base de la pendiente noroeste de la pila (Fase 3) están revestidas con geomembrana texturizada en ambos lados.
- Sobre-revestimiento (*overliner*): Capa de material granular de espesor mínimo de 60 cm colocado sobre áreas planas de la geomembrana (cerca de la base de la Fase 1). Además, se usó como material de cobertura y protección alrededor de las tuberías perforadas (de drenaje) de recolección de soluciones, tanto principales como secundarias.

En orden ascendente, los componentes de la pila se colocaron de la siguiente forma sobre la fundación (ver Figura 1):

1. Relleno
2. Subbase preparada
3. *Soil liner*
4. Liner (lisa o texturizada)
5. *Overliner*

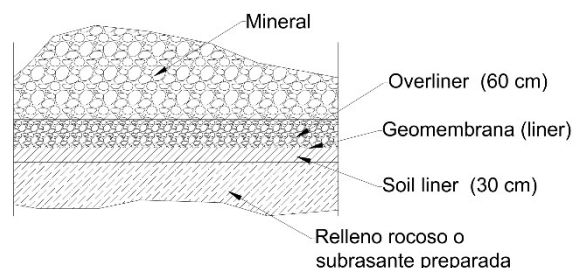


Figura 1. Esquema de componentes de la pila.

2.3 Sistema de recolección de soluciones (tuberías perforadas)

Conformado por tuberías de polietileno corrugado perforado (PCPE) e instaladas en los tramos bajos de la topografía y en áreas planas cerca de la base del lado noroeste. El diámetro usado en el área más plana fue de 100 mm y separación aproximada de 6 m. En las zonas más profundas, se usaron diámetros de 200 mm, 300 mm y 380 mm. En la zona occidental, en la base y pendiente del valle, se usaron diámetros de 200 y 250 mm, todas con dirección pendiente abajo.

2.5 Componentes de la pila

- Aglomerado de mineral lixiviado: Desde el punto de vista geotécnico es una arena arcillosa con grava de compactación relativa suelta a medianamente densa.

- Sistema de transporte de mineral: Transportadores portátiles de tipo "Grass Hopper".
- Sistema de apilamiento: apilador radial y tendido del mineral con tractor Bulldozer. Conformación de plataformas de lixiviación de aproximadamente 8 m de espesor.
- Sistema de aplicación de la solución: Emisores de goteo y rociadores.
- Piletas: Solución rica y Contingencia No. 1 y No. 2
- Área de Planta de Procesos
- Área de Trituración
- Canal de Solución

3 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los análisis de sensibilidad son herramientas fundamentales en la ingeniería geotécnica, ya que permiten evaluar el impacto de la incertidumbre en parámetros críticos sobre la estabilidad de estructuras como patios de lixiviación.

Su aplicación ofrece beneficios clave:

- Identificación de variables críticas: Facilitan la detección de los parámetros de diseño que tienen mayor influencia en el factor de seguridad (FS), permitiendo priorizar esfuerzos en su caracterización y control.
- Gestión de riesgos: Al simular escenarios con variaciones en propiedades geotécnicas, se pueden anticipar condiciones que comprometan la estabilidad, como deterioro de la interfaz o daños en la geomembrana, y definir medidas preventivas.
- Posible optimización de diseños: Proporcionan información para robustecer los elementos más sensibles, orientando la inversión en pruebas de laboratorio y monitoreo hacia los componentes que realmente controlan la estabilidad.
- Cumplimiento de normativa: Permiten demostrar que se han evaluado escenarios críticos y que la estructura mantiene márgenes de seguridad adecuados bajo diversas condiciones, fortaleciendo la transparencia y la aceptación regulatoria.

Los análisis de sensibilidad no solo mejoran la confiabilidad del diseño, sino que también aseguran la viabilidad a largo plazo del patio de lixiviación, reduciendo riesgos operativos y ambientales.

4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Debido a las fases de construcción, la Fase 1 (Pila 1) se encuentra al pie del HLF acotada por un muro aguas arriba que limita la superficie de falla manteniendo FS superiores a 1.5. Por tal razón, el

análisis de sensibilidad se realizó únicamente para para la Fase 2 y 3 (Pila 2).

4.1 Metodología

El análisis de sensibilidad se realizó para evaluar el impacto de la resistencia al corte en la interfaz *soil liner*-geomembrana sobre la estabilidad global del patio de lixiviación. El procedimiento se desarrolló en las siguientes etapas:

1. Definición del parámetro variable: Se seleccionó la función de resistencia al corte de la interfaz *soil liner*-geomembrana como el parámetro crítico a modificar. Esta función se obtuvo a partir de ensayos de laboratorio realizados durante la etapa de diseño.
2. Aplicación del factor de ajuste (κ): Para simular variaciones en la resistencia, se aplicó un factor multiplicativo denominado kappa (κ) a la función de resistencia original. La relación se expresa como:

$$\sigma_n = \kappa f(t) \quad (1)$$

Donde: σ_n =función de resistencia, κ =factor kappa, $f(t)$ =función de resistencia a partir de prueba de laboratorio.

El factor κ varía desde 0.5 hasta 1.5 en incrementos de 10%. Este rango permite evaluar escenarios desde una reducción significativa (50%) hasta un incremento moderado (50%) en la resistencia de la interfaz.

Diversos autores han estudiado los incrementos y decrementos en la resistencia de interfaz entre suelos y geomembranas, Abu Farsakh *et al.* (2007) identificaron una reducción considerable en la resistencia de interfaz con el incremento de contenido de agua del suelo y decrecimiento en la densidad del suelo. Ferreira *et al.* (2015) Identificaron que la densidad del suelo se correlaciona positivamente con la resistencia al corte de la interfaz suelo - geomembrana, aunque, se tiene un aumento más pronunciado en las interfaces de suelo con geomembrana.

Fleming *et al.* (2006) realizaron una serie de pruebas en corte directo e identificaron un aumento en el ángulo de fricción de la resistencia con el incremento de la densidad del suelo. Varios factores, como la precipitación, la infiltración de agua subterránea y las variaciones estacionales de la humedad, pueden afectar el contenido de humedad del suelo y reducir la resistencia al corte de las interfaces suelo - geomembrana, lo que resulta en grandes deformaciones o fallas (Hatami *et al.*, 2012).

4.2 Geometría

Se utilizó la geometría actual del HLF, conformada por capas de mineral de 8 m de espesor, con taludes de

1.5H:1V y altura total de 58 m. El análisis se realizó en dos dimensiones mediante el software GeoStudio – SLOPE/W, considerando superficies de falla circulares.

4.3 Condiciones base

En los análisis se consideraron como parámetros fijos propiedades del mineral, del *overliner* y las de la fundación (terreno natural).

La fundación se consideró como impenetrable debido a que sus propiedades cuentan con una resistencia superior en comparación con los demás componentes.

Los parámetros del mineral y del *overliner* se obtuvieron con base en informes realizados por empresas externas durante la etapa de diseño y construcción.

La Tabla siguiente presenta los parámetros considerados para el mineral y el *overliner*.

Tabla 1. Parámetros fijos.

Nombre	Peso unitario (kN/m ³)	Cohesión efectiva (kPa)	Ángulo de fricción efectivo (°)
Mineral	18.54	0	36
Overliner	20	0	40

4.4 Función de resistencia de la interfaz

Es una práctica común medir la resistencia al corte en la interfaz con un aparato de corte directo, como el que se utiliza en mecánica de suelos, pero con un plano de corte más amplio. La mayoría de los aparatos de corte directo que se utilizan actualmente para ensayos de corte en geosintéticos tienen una caja o marco superior con un área de ensayo de aproximadamente 300 mm x 300 mm. La parte inferior del aparato de corte directo tiene un área de ensayo igual o una caja más larga que la superior en la dirección del movimiento de corte, de modo que el área de corte se mantiene constante durante el ensayo.

La función de resistencia al corte de la interfaz de Fase 1, 2 y 3 fue desarrollada por empresas externas a Knight Piésold a partir de resultados de laboratorio.

Las pruebas de corte directo usaron mineral producido durante y después del 2013 y arcilla proveniente del depositado en el revestimiento de *soil liner*.

Se consideraron pruebas usando geomembrana texturizada con la cual fue cubierta la Fase 3. La función de resistencia al corte de la interfaz fue determinada con el promedio de dos resultados.

En las pruebas de corte directo, la falla pareció ocurrir entre la arcilla y la geomembrana, y en el último esfuerzo normal, la falla pareció ocurrir entre la arcilla

y la geomembrana con un poco de estiramiento y bultos en la geomembrana.

Los valores de la resistencia de la interfaz en la Fase 2 y 3 entre *soil liner* y geomembrana se presentan en la Tabla 2.

Vale la pena mencionar que la interfaz entre *soil liner* y geomembrana se simuló en GeoStudio como una región de material con un espesor constante de 30 cm como en diseño, el modelo se puede apreciar en la Figura 2.

Tabla 2. Resistencia de la interfaz *soil liner*-geomembrana.

Esfuerzo Normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0
170.388	93.328
344.97	173.436
687.027	300.385

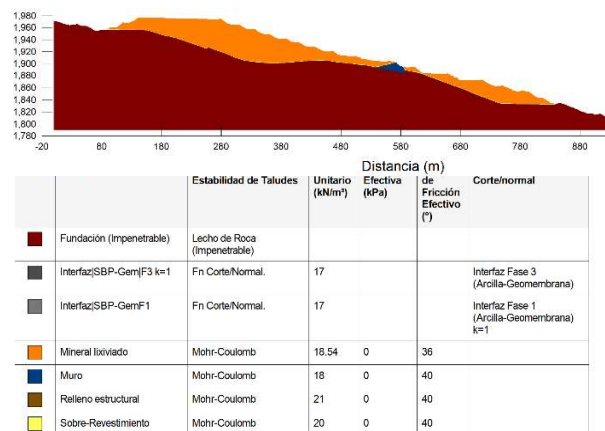


Figura 2. Modelo del HLF y propiedades de cada material.

Con base en la metodología descrita anteriormente, se procedió a afectar la resistencia de la interfaz elegida por el factor kappa.

La gráfica que se aprecia en la Figura 3, muestra el rango de esfuerzos que abarcan las funciones de resistencia de la interfaz con las cuales se realizará el análisis de sensibilidad.

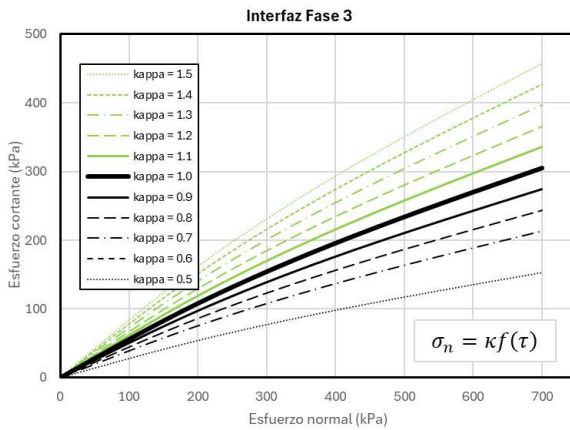


Figura 3. Función de resistencia de la interfaz afectada por los factores kappa.

5 RESULTADOS

Se realizó una primera corrida de análisis mediante el software *GeoStudio-Slope/W* con la búsqueda de la superficie crítica considerando una falla circular. Los resultados mostraron una superficie de falla que atraviesa predominantemente la interfaz de *soil liner* y geomembrana definida como una región de material, esta situación se presenta desde $k=0.5$ hasta $k=1.1$. LA superficie de falla de $k=1.2$ en adelante se mantiene en los taludes del mineral del patio de lixiviación.

La Figura 4 presenta el análisis de estabilidad con $kappa=1$ en la cual el software realiza la búsqueda de superficie crítica.

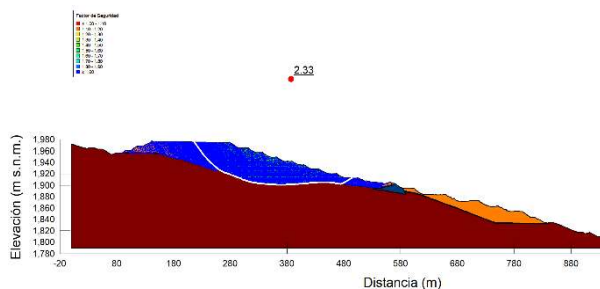


Figura 4. Resultado de análisis de estabilidad para $k=1$.

Las siguientes corridas se realizaron para los valores $k=0.5$ hasta $k=1.5$, los resultados se aprecian en la Tabla 3 y Figuras 5 a 15.

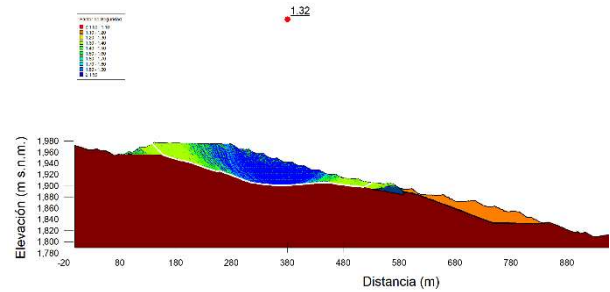


Figura 5. Resultado de análisis de estabilidad para $k=0.5$.

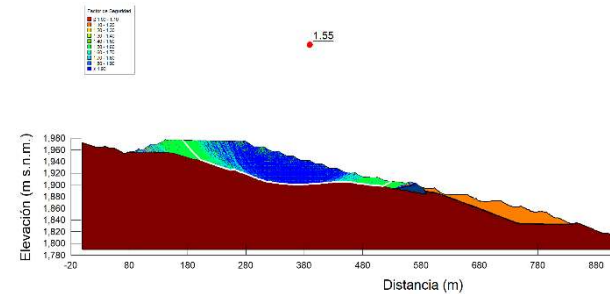


Figura 6. Resultado de análisis de estabilidad para $k=0.6$.

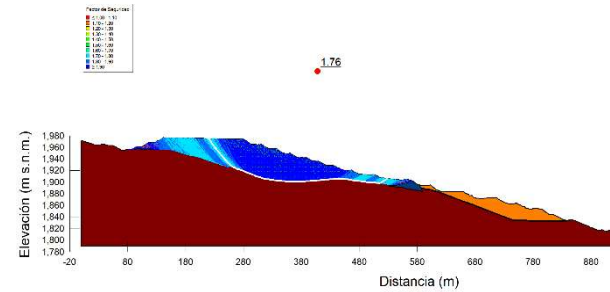


Figura 7. Resultado de análisis de estabilidad para $k=0.7$.

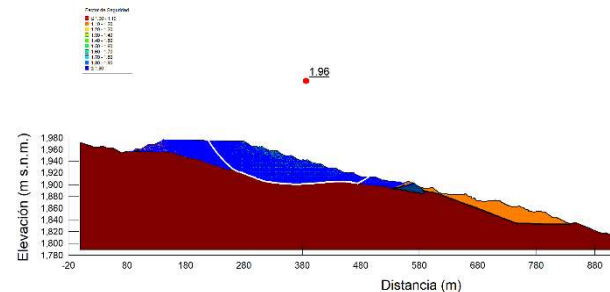


Figura 8. Resultado de análisis de estabilidad para $k=0.8$.

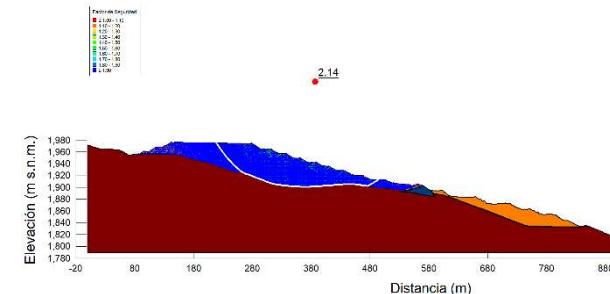


Figura 9. Resultado de análisis de estabilidad para $k=0.9$.

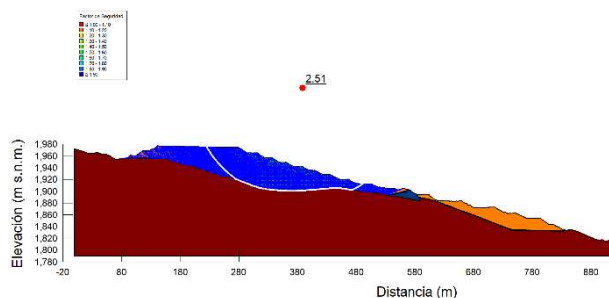


Figura 10. Resultado de análisis de estabilidad para k=1.1.

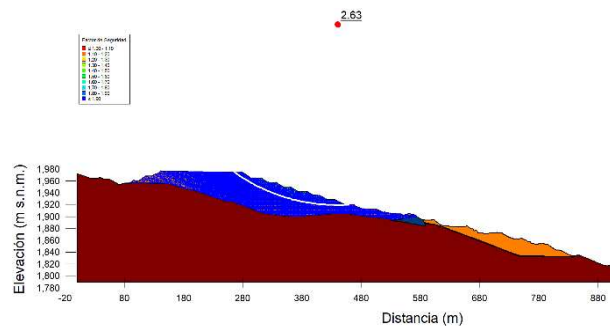


Figura 14. Resultado de análisis de estabilidad para k=1.5.

Tabla 3. Resultados de primera serie de análisis.

Función de resistencia (σ_n)	Factor de seguridad
0.5	1.32
0.6	1.55
0.7	1.76
0.8	1.96
0.9	2.14
1.0	2.33
1.1	2.51
1.2	2.63
1.3	2.63
1.4	2.63
1.5	2.63

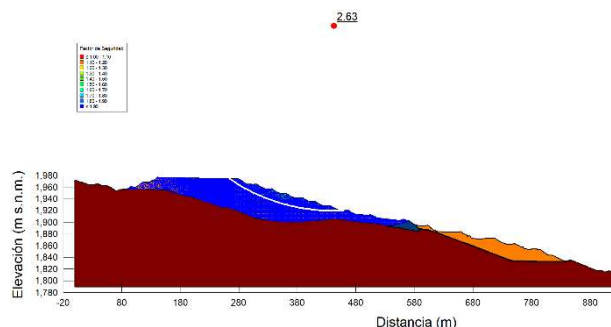


Figura 11. Resultado de análisis de estabilidad para k=1.2.

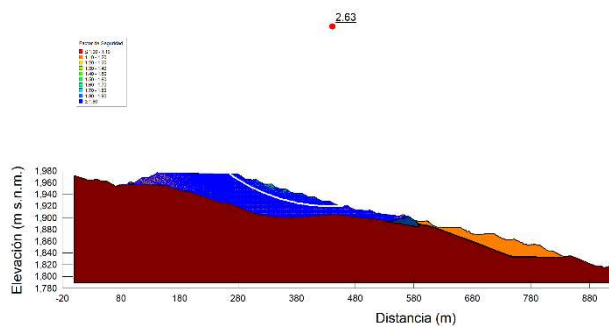


Figura 12. Resultado de análisis de estabilidad para k=1.3.

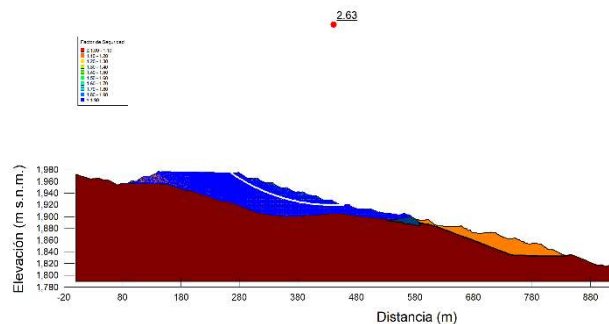


Figura 13. Resultado de análisis de estabilidad para k=1.4.

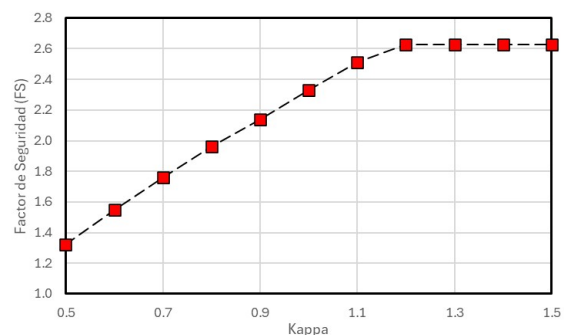


Figura 15. Resultados FS contra la variable kappa.

Posteriormente, en un segundo grupo de análisis, se consideró la superficie de falla de Kappa=1 para acotar la superficie de análisis nuevamente desde kappa= 0.5 hasta kappa=1.5.

Los resultados presentaron el FS sobrestimado ya que se está forzando la falla por la misma superficie de falla crítica para k=1 (ver Figura 16).

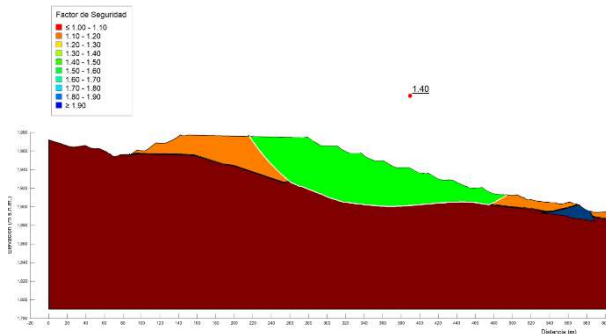


Figura 16. Resultados FS con $k=0,5$ limitados a la superficie de falla de $k=1$.

Posteriormente, se graficaron los resultados de ambas corridas, la primera corrida buscando la superficie crítica, y la segunda corrida limitando la superficie de búsqueda a la falla crítica encontrada con $k=1$. Los resultados se presentan en la Tabla 4 y Figura 17.

Tabla 4. Resultados de segunda serie de análisis.

Función de resistencia (σ_n)	Factor de seguridad limitados
0.5	1.4
0.6	1.59
0.7	1.77
0.8	1.96
0.9	2.14
1.0	2.33
1.1	2.51
1.2	2.7
1.3	2.88
1.4	3.06
1.5	3.25

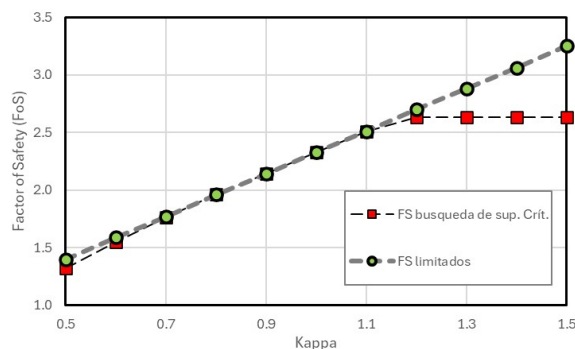


Figura 17. Resultados FS de corrida en búsqueda de superficie crítica y corridas limitando la falla a la superficie crítica de falla.

6 DISCUSIÓN

Los análisis realizados identificaron mecanismos de falla circulares que atraviesan la interfaz localizada entre la fundación y el *overliner*. Sin embargo, a partir de $\kappa = 1.2$, la superficie crítica se desplaza hacia los taludes del apilamiento, lo que indica que la interfaz deja de controlar la estabilidad y el factor de seguridad (FS) se estabiliza en 2.63.

De las primeras corridas de análisis, donde el software busca la superficie de falla crítica, se observa que ante una variación de la función de resistencia de la interfaz *soil liner*-geomembrana, los FS se afectan considerablemente demostrando una alta sensibilidad en la función de resistencia de la interfaz.

Ante una disminución del 50% de la resistencia, el HLF se considera inestable. Esto cobra relevancia ya que una vez que se cuente con resultados actualizados (muestreo en Fase 3 durante etapa de cierre) de función de resistencia en la interfaz, se podrá identificar de manera rápida y preliminar, el comportamiento del HLF.

Por otro lado, incrementos superiores al 20% en la resistencia ($\kappa \geq 1.2$) no generan cambios significativos en la estabilidad, lo que indica que el diseño actual es robusto frente a mejoras en la interfaz.

Los resultados obtenidos al término de la segunda corrida de análisis sobrestiman el factor de seguridad cuando las propiedades de la interfaz se deterioran, demostrando que las propiedades actuales de la interfaz en la Fase 3 son adecuadas proporcionando estabilidad al HLF aún cuando se presente deterioro en sus propiedades.

En síntesis, los resultados confirman que la estabilidad global del HLF depende fuertemente de la resistencia de la interfaz en condiciones críticas. La cuantificación de la variabilidad de la resistencia a la corte medida en la interfaz permite comprender su impacto en el diseño (Dixon, 2010).

Una caracterización precisa mediante pruebas actualizadas en la Fase 3 permitirá anticipar riesgos y definir medidas correctivas oportunas. Además, se evidencia que el diseño actual proporciona un margen de seguridad suficiente incluso ante deterioros moderados en la interfaz.

7 CONCLUSIONES

La estabilidad global del patio de lixiviación (HLF) está fuertemente condicionada por la resistencia al corte en la interfaz *soil liner*-geomembrana. Este componente controla los mecanismos de falla en escenarios críticos.

Una reducción del 50% en la resistencia de la interfaz ($\kappa = 0.5$) disminuye el factor de seguridad (FS) a 1.32, clasificando la estructura como inestable (CDA, 2014). Esto evidencia la necesidad de

monitoreo para definir medidas de acción ante posibles degradaciones.

Incrementos superiores al 20% en la resistencia ($\kappa \geq 1.2$) no generan mejoras significativas en la estabilidad, lo que indica que el diseño actual es robusto.

El diseño proporciona un margen de seguridad suficiente incluso ante deterioros moderados en la interfaz, respaldando su confiabilidad y desempeño en condiciones de cierre.

Es fundamental realizar pruebas actualizadas en la resistencia de la interfaz en las Fases 1,2 y 3 para caracterizar con precisión y anticipar riesgos. Esta práctica permitirá definir medidas correctivas oportunas y garantizar la estabilidad a largo plazo.

8 AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Knight Piésold y a la comunidad de profesionales que nos rodea por compartir información, experiencias y criterios técnicos sobre patios de lixiviación (*heap leach facilities*).

REFERENCIAS

- Abu-Farsakh, M., Coronel, J., Tao, M. (2007). "Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*", 19: 540-549.
- Barreda, G., Chahua, L. (2014). "Heap leach pads—The importance of proper testing, interpretation, and analysis of soil liner geomembrane interfaces", *Proceedings of Heap Leach Solutions*, Lima, Perú, Vol. 2: 405-416.
- Canadian Dam Association. *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams* (2014).
- Dixon, N. (2010). "Soil-geosynthetic interaction: Interface behaviour", *9th International Conference on Geosynthetics*, Brazil: 563-581.
- Ferreira, F. B., Vieira, C. S. López, M. L. (2015). "Direct shear behaviour of residual soil-geosynthetic interfaces-influence of soil moisture content, soil density and geosynthetic type", *Geosynthetics International*, Vol. 22: 257-272.
- Fleming, I.R., Sharma, J.S., Jogi, M.B. (2006). "Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions". *Geotextiles and Geomembranes*, 24, No. 5: 274-284.
- Hatami, K., Esmaili, D., Granados, J.E., Miller, G.A. (2012). "Pullout response of geotextile reinforcement at different matric suctions". *Proceedings of 5th European Geosynthetics Congress - EUROGEO 5, Valencia, Spain*, Vol. 5: 281-286.