

Análisis de Envolventes no Lineales de Resistencia Cortante de Interface Suelo-Geomembrana y su Influencia en la Estabilidad de Pilas de Lixiviación

D. Parra, Anddes Asociados S.A.C., Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

R. Valdivia, Anddes Asociados S.A.C., Lima, Perú

C. Soto, Ausenco Perú S.A.C., Lima, Perú

RESUMEN

La resistencia al corte de la interface suelo de baja permeabilidad-geomembrana, comúnmente utilizada en análisis de estabilidad de pilas de lixiviación, es obtenida a partir de ensayos de laboratorio de corte directo a gran escala, utilizando un substrato rígido en la caja inferior del equipo de corte directo. Este estudio presenta una revisión de los resultados de una gran cantidad de ensayos de corte directo a gran escala, realizados en interfaces de suelo de baja permeabilidad, provenientes de diferentes proyectos mineros en el Perú, y geomembranas de LLDPE y HDPE de diferente espesor y textura, en la mayoría de los cuales se ha observado una clara tendencia no lineal de la envolvente de resistencia cortante.

Este estudio compara la influencia de usar envolventes lineales y no lineales en la estabilidad de una pila de lixiviación, considerando dos casos reales de envolventes de resistencia cortante y casos de pilas de lixiviación de diferentes alturas. Se incluye además una discusión de la influencia de altos y bajos esfuerzos normales en la resistencia al corte de la interface, donde la diferencia de esta resistencia es importante cuando se usan envolventes lineales o no lineales; en estos casos la envolvente lineal puede sobre estimar la resistencia de la interface, y por lo tanto, los factores de seguridad en el análisis de estabilidad, sobre todo cuando se analizan pilas de lixiviación de gran altura (mayores a 150 m), cada vez más comunes en minería, donde el esfuerzo vertical puede llegar a ser muy alto, por encima de la capacidad de los equipos de corte directo a gran escala.

ABSTRACT

The shear strength of the low permeability soil-geomembrane interface, commonly used in heap leach pad stability analysis, is obtained based on large scale direct shear laboratory testing, by using a rigid substrata in the lower box of the direct shear device. This paper presents a review of a large database of large scale direct shear testing, performed in low permeability soil, from different mining projects in Peru, and LLDPE and HDPE geomembranes, of different thickness and texture, in most of which a clear non linear trend of the shear strength envelope have been observed.

This study compares the influence of using linear and non linear envelopes in the heap leach pad stability, considering two actual cases of shear strength envelopes and cases of different height of the heap. In addition, a discussion of the influence of high and low normal stresses in the interface shear strength is included, where the difference of this strength is important when linear or non linear envelope is used; in these cases the linear envelope could overestimate the interface strength, and therefore, the factor of safety in the stability analysis, especially when very tall heap leach pads are analyzed (taller than 150 m), increasingly commons in mining, where the vertical stress could be very high, much more higher than the capacity of the large scale direct shear equipments.

1. INTRODUCCIÓN

En un estudio anterior (Parra et al., 2010) los autores discutieron los resultados de ensayos de corte directo a gran escala para determinar la resistencia al corte de interfaces suelo de baja permeabilidad-geomembrana utilizando dos procedimientos que diferían en el material utilizado en la parte inferior de la caja de corte: sub-estrato rígido o suelo de sobre-revestimiento (overliner). En ambos casos la geomembrana es fijada con el lado texturado en contacto con el suelo de baja permeabilidad, tal y conforme lo recomiendan los diseños típicos de pads de lixiviación, mientras que el lado liso es colocado ya sea en contacto con el sub-estrato rígido o con el sobre-revestimiento.

Los autores concluyeron que los ensayos con el sub-estrato rígido proporcionan resultados más conservadores en términos del ángulo de fricción y adhesión en la interface suelo-geomembrana. Asimismo, análisis preliminares de estabilidad, considerando envolventes de resistencia lineal y no lineal realizados como parte de ese trabajo, ya indicaban diferencias en los factores de seguridad para el análisis de estabilidad de una pila de 100 m de altura.

En este trabajo se presenta la revisión de resultados de una gran cantidad de ensayos de corte directo a gran escala para la determinación de la resistencia al corte de interface suelo-geomembrana, y se presenta un análisis comparativo de casos hipotéticos de pilas de lixiviación de diferentes alturas, utilizando envolventes lineales y no lineales.

2. REVISIÓN DE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO A GRAN ESCALA

La resistencia al corte de interfaces suelo-geomembrana es determinada a partir de ensayos de corte directo a gran escala (LSDS), de acuerdo a los procedimientos recomendados por la norma ASTM D 5321. En este ensayo una muestra de suelo de baja permeabilidad (soil liner) es colocada sobre una lámina de geomembrana lisa o texturada, fijada al equipo y ensayada en condiciones de corte directo. Típicamente se reportan valores de ángulo de fricción y adhesión en la interface suelo-geomembrana a partir de un ajuste lineal por mínimos cuadrados, que representan las propiedades de resistencia cortante de la interface.

Debido al enorme auge de la minería en el Perú en la última década y al significativo incremento en el precio de los metales experimentado en los últimos años, numerosos proyectos mineros han sido ejecutados o se encuentran en desarrollo, incluyendo aquellos relacionados al procesamiento del mineral mediante lixiviación en pilas. Debido a lo anterior en los últimos años una gran cantidad de datos relacionados a resultados de ensayos de laboratorio han sido acumulados, que han sustentado el diseño de pads de lixiviación, tales como ensayos de corte directo a gran escala para la obtención de la resistencia al corte de interfaces suelo-geomembrana, que han sido utilizados para el estudio de la estabilidad geotécnica de este tipo de instalaciones.

El laboratorio de Ausenco Vector en Lima dispone de una extensa base de datos de resultados de ensayos de interface de corte directo a gran escala llevados a cabo desde el año 2006. En esta base de datos se incluyen geomembranas lisas y texturadas, de HDPE (polietileno de alta densidad) y LLDPE (polietileno de baja densidad lineal), y de 1,5 y 2,0 mm de espesor. Se revisaron un total de 126 ensayos de corte directo a gran escala suelo-geomembrana, con comportamiento lineal y no lineal. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados de ensayos por cada sub-categoría:

Tabla 1. Resultados de ensayos de corte directo a gran escala.

Geomembrana	Lado Texturado			Lado Liso			Total
	Lineal	No Lineal	Sub-Total	Lineal	No Lineal	Sub-Total	
LLDPE	11	78	89	15	6	21	110
HDPE	2	5	7	2	7	9	16
Total	13	83	96	17	13	30	126

A partir de la revisión esta extensa base de datos de resultados de ensayos de corte directo a gran escala, se puede observar lo siguiente:

- Este tipo de ensayos son realizados usualmente con un mínimo de 4 especímenes, con la finalidad de obtener una mejor definición de la envolvente de resistencia.
- Los reportes del laboratorio presentan resultados de envolvente para condiciones de resistencia pico y para resistencia a 7 cm de desplazamiento del equipo de corte (resistencia post-pico).
- De los 126 ensayos realizados, 110 (87%) fueron ejecutados utilizando geomembrana de LLDPE y 16 (13%) con geomembrana HDPE. La geomembrana de LLDPE es frecuentemente seleccionada en el diseño de pilas de lixiviación, debido a sus mejores características de elongación, incremento de la resistencia cortante por su mejor acomodo con el suelo, y mayor resistencia al punzonamiento. Esta tendencia en el uso de geomembrana de LLDPE ha sido observada con mayor frecuencia en años recientes.
- Se ensayaron interfaces entre suelo de baja permeabilidad (suelo arcilloso) y el lado liso y texturado de geomembranas de LLDPE o HDPE.
- De los 96 resultados de ensayos de interface realizados con geomembrana texturada (LLDPE y HDPE), solo en 13 ensayos (14%) se observó una tendencia lineal de la envolvente de resistencia, mientras que en 83 ensayos (86%) se observó una tendencia no lineal de dicha envolvente.
- La tendencia lineal es observada principalmente en ensayos de interface con el lado liso de geomembranas de LLDPE, 15 ensayos (71%) de 21 en total.
- En la gran mayoría de los casos el ajuste lineal de la envolvente de resistencia proporciona un valor de adhesión de la interface, que no es observado cuando se extrae la resistencia cortante a bajos niveles de esfuerzos. Este hecho es aún más evidente al observar los resultados para 7 cm de desplazamiento y menos evidente para condiciones de resistencia pico.
- Los valores del ángulo de fricción y adhesión obtenidos a partir del ajuste lineal, son muy variables y su discusión y análisis no es el objetivo del presente trabajo.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO

3.1 Condiciones y Casos Analizados

Con la finalidad de evaluar la influencia de la no linealidad de la envolvente de resistencia de la interface suelo-geomembrana en la estabilidad de una pila de lixiviación, se realizó un estudio comparativo, analizando casos hipotéticos de pilas de lixiviación y asumiendo propiedades de resistencia cortante de la interface correspondiente a 2 casos reales de la base de datos revisada, los cuales presentaron una envolvente de resistencia no lineal bien definida. Se presenta a continuación un resumen de las condiciones analizadas:

- Se analizaron pilas de lixiviación de diferentes alturas: 10, 50, 100, 150, 200 y 250 m. En la Figura 1 se presentan los 6 casos analizados. El caso de 10 m de altura permite evaluar la primera capa de una pila de lixiviación, donde debido a que el talud se analiza con su ángulo de reposo, usualmente presentan las condiciones más críticas de estabilidad de este tipo de instalaciones. El caso de 250 m de altura permite evaluar condiciones extremas de una pila de gran altura. Los casos intermedios corresponden a condiciones reales de pilas de lixiviación en operación o en proyecto.
- Se consideró un apilamiento de 10 m de altura de banco, colocados de manera horizontal y con un talud global de 2,5H:1V que es típico de pilas de lixiviación.
- Se consideró 2 casos de envolvente de resistencia de la interface suelo-geomembrana, tomados de la base de datos de ensayos de corte directo a gran escala. Los 2 casos corresponden a resultados de geomembrana de LLDPE lado texturado versus suelo arcilloso de baja permeabilidad, variando solo el espesor. En la Figura 2 se presentan los diagramas de esfuerzo normal versus esfuerzo de corte para los 2 casos analizados. Los espesores de las geomembranas utilizadas fueron:
 - Caso 1: geomembrana de LLDPE de 1,5 mm.
 - Caso 2: geomembrana de LLDPE de 2,0 mm.
- En la Figura 2 la envolvente lineal representa el mejor ajuste para los resultados del ensayo, mientras que la envolvente no lineal considera el comportamiento real de los especímenes ensayados; la parte inicial de la envolvente con punto inicial igual a (0,0), fue asumida extrapolando la curva a partir del menor esfuerzo de confinamiento.
- Se consideró las siguientes propiedades para el mineral de la pila: densidad húmeda de 18 kN/m³; ángulo de reposo igual a 1,33H:1V; envolvente de resistencia lineal a partir del criterio de Mohr-Coulomb, con un ángulo de fricción igual a 37° y cohesión nula.
- Se asumió una cimentación competente, caso común en muchos pads de lixiviación ubicados en zonas alto andinas, debido a que este estudio no considera la influencia de la cimentación en la estabilidad de la pila.
- Se consideró una base uniforme del pad de lixiviación con pendientes de 2 y 4%, las cuales corresponden a casos extremos de la plataforma inicial del pad. Un talud de 2% corresponde a una condición mínima para favorecer el drenaje de la solución, mientras que 4% corresponde a una condición a partir de la cual es posible que se requiera la construcción de un dique de estabilidad para contener la pila.

3.2 Metodología Utilizada

Los análisis de estabilidad para los casos indicados fueron realizados utilizando el programa Slide (Rocscience) a través del método de Spencer por equilibrio límite. Para cada caso se utilizó la envolvente lineal y no lineal en cada altura de pila analizada. Con la finalidad de estudiar únicamente los efectos de la no linealidad en la estabilidad de la pila, las propiedades del mineral se mantuvieron constantes, es decir, no se consideró condiciones de envolvente no lineal típicos de materiales granulares sometidos a grandes esfuerzos de confinamiento.

3.1 Resultados Obtenidos

En la Tabla 2 se presentan los factores de seguridad obtenidos para cada caso analizado, y para las diferentes alturas y pendiente de la base. En la Figura 3 se presenta un resultado típico del análisis de estabilidad, mientras que en las Figuras 4 y 5 se presentan las gráficas de los resultados obtenidos. Asimismo, se calcularon los esfuerzos normales promedio en la superficie de falla crítica a lo largo de la interface suelo-geomembrana para cada altura de pila analizada, con la finalidad de observar el rango de esfuerzos normales en la interface equivalente a la altura de la pila analizada y la correspondiente resistencia cortante de la interface, considerando comportamiento lineal y no lineal. Los esfuerzos normales promedio en la interface suelo-geomembrana son mostrados en la Figura 6, solo para el Caso 2.

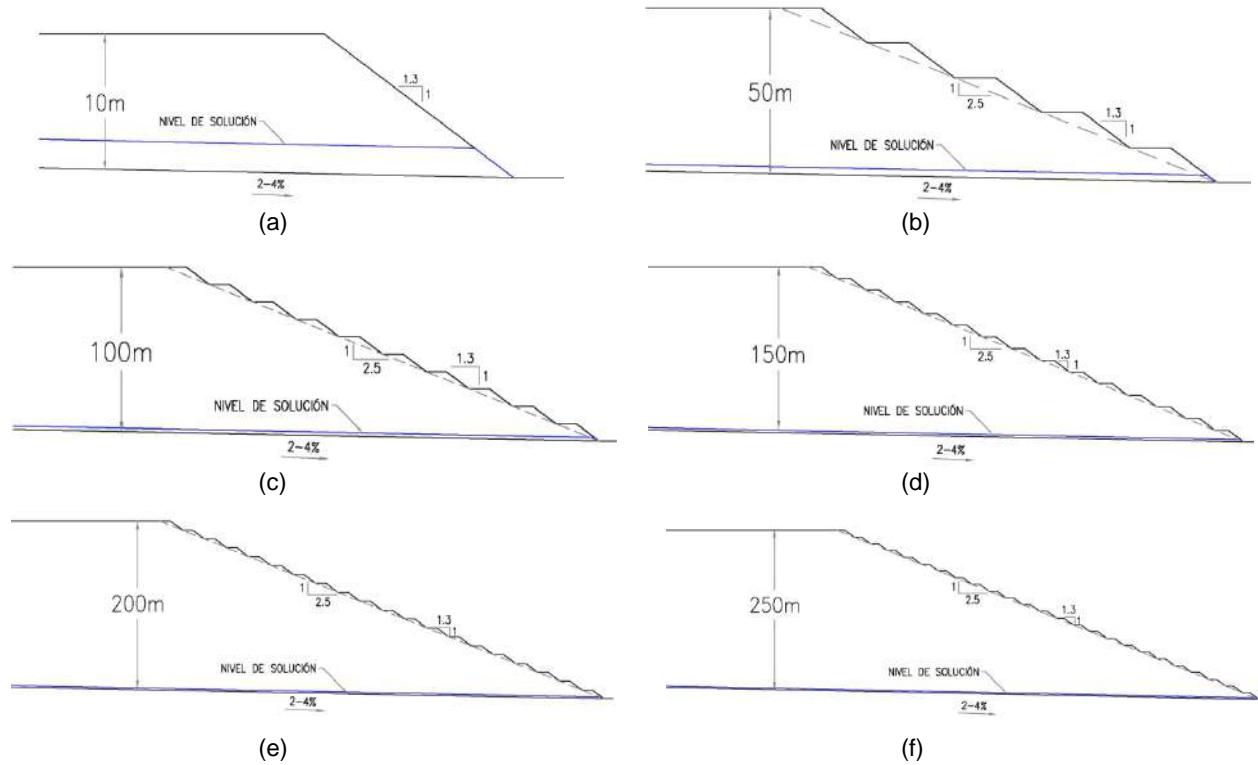


Figura 1. Pilas de lixiviación analizadas con diferentes alturas. a) 10m, b) 50 m, c) 100 m, d) 150 m, e) 200 m, f) 250 m.

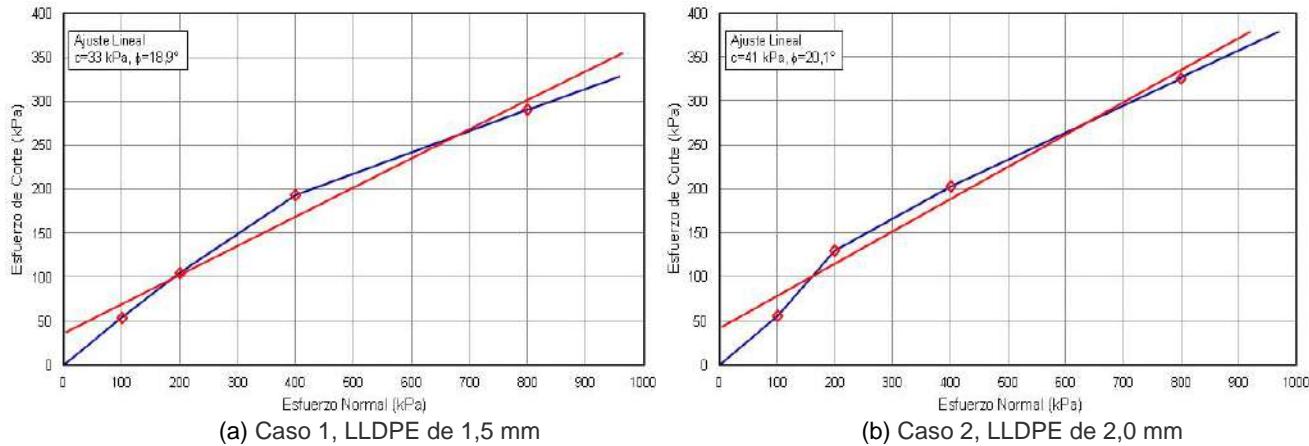


Figura 2. Esfuerzo normal versus esfuerzo de corte.

Tabla 2. Factores de seguridad obtenidos para los Casos 1 y 2.

Altura de la Pila (m)	CASO 1				CASO 2			
	Pendiente = 2% Lineal		Pendiente = 4% Lineal		Pendiente = 2% Lineal		Pendiente = 4% Lineal	
10	1,64	1,00	1,64	1,00	1,55	0,96	1,55	0,96
50	1,85	1,89	1,85	1,89	1,76	1,79	1,76	1,79
100	1,76	1,76	1,76	1,76	1,70	1,70	1,66	1,66
150	1,73	1,70	1,73	1,70	1,67	1,63	1,63	1,59
200	1,71	1,67	1,71	1,67	1,65	1,58	1,62	1,54
250	1,69	1,64	1,69	1,64	1,64	1,55	1,61	1,51

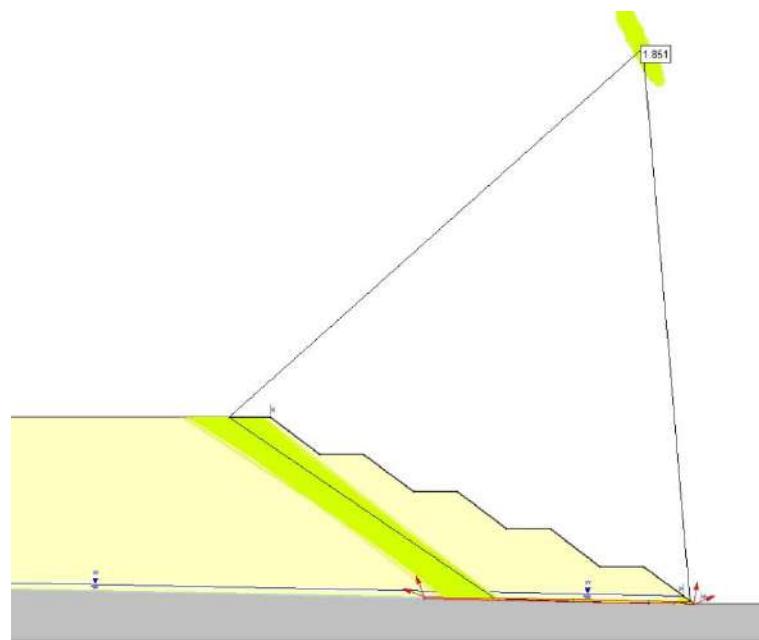


Figura 3. Salida típica del análisis de estabilidad.

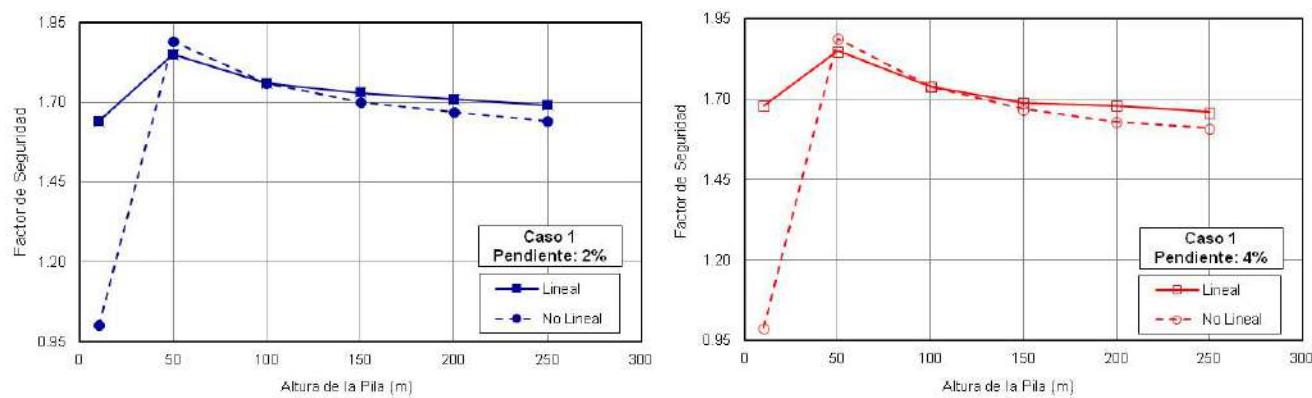


Figura 4. Altura de la pila versus factores de seguridad obtenidos, Caso 1.

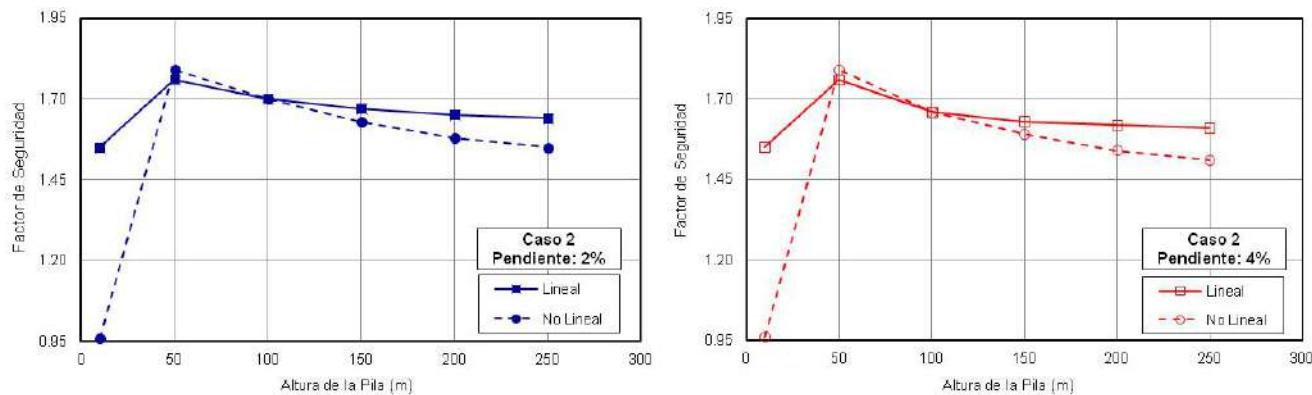


Figura 5. Altura de la pila versus factores de seguridad obtenidos, Caso 2.

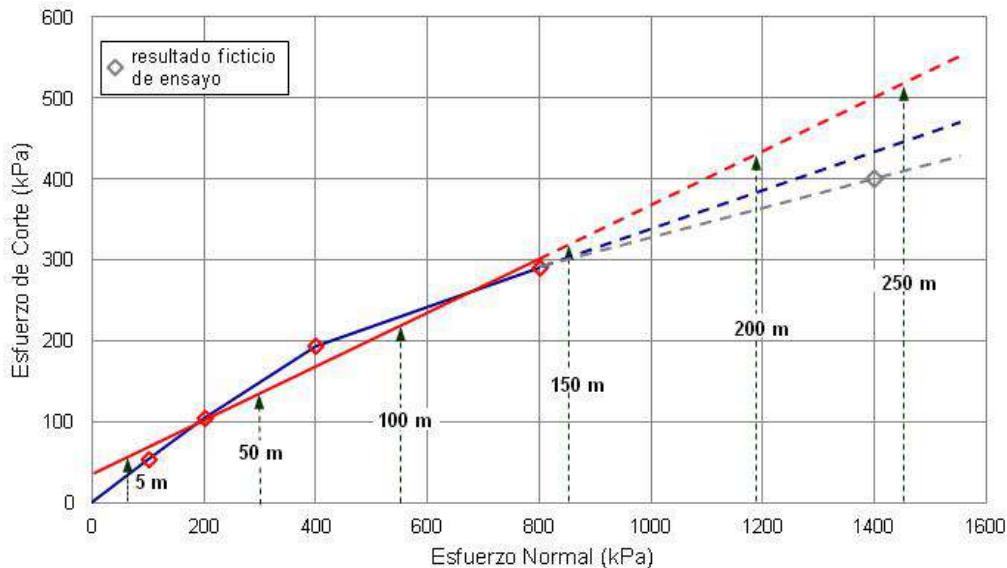


Figura 6. Esfuerzos normales promedios en la superficie de falla crítica y extrapolación de la envolvente.

Se presentan los siguientes comentarios a partir de los resultados obtenidos:

- La tendencia de los factores de seguridad obtenidos son similares para los dos casos analizados y para pendientes de 2 y 4%.
- El análisis de un solo banco de 10 m de altura proporciona un factor de seguridad relativamente bajo en todos los casos analizados, pero se evidencia aún más para el caso de envolvente no lineal, debido principalmente a la significativa diferencia de la resistencia cortante a bajos niveles de esfuerzo normal, como se observa en las Figuras 2 y 6.
- Para alturas de 50 y 100 m los factores de seguridad son similares o iguales, tanto para envolvente lineal como no lineal; esto se explica debido a que los esfuerzos normales promedio a lo largo de la interface que representan estas alturas, proporcionan similar resistencia cortante para envolvente lineal y no lineal, tal como se observa en la Figura 6.
- Para alturas de 150 m y mayores, se obtienen menores factores de seguridad con la envolvente no lineal, lo cual se explica por la cada vez mayor diferencia de la resistencia cortante entre ambas envolventes como consecuencia del incremento del esfuerzo normal, como se observa en la Figura 6.

4. RESISTENCIA CORTANTE PARA ALTOS Y BAJOS ESFUERZOS NORMALES

4.1 Extrapolación de Envolvente

La resistencia cortante para altos esfuerzos normales, mayores a los aplicados en un ensayo de corte directo a gran escala, es obtenida usualmente extrapolando los resultados del ensayo dentro del rango de esfuerzos aplicados. En la Figura 6 se presenta la extrapolación de las envolventes lineal y no lineal para esfuerzos mayores a 800 kPa, que fue el máximo valor de los ensayos de la base de datos utilizada. Hay algunos aspectos que merecen los siguientes comentarios:

- Como se puede observar el esfuerzo normal promedio para pilas de altura iguales o mayores a aproximadamente 150 m, excede el rango del esfuerzo normal máximo utilizado en los ensayos de corte directo a gran escala.
- Entonces para realizar el análisis de estabilidad de pilas de gran altura que presentan altos esfuerzos normales a lo largo de la interface suelo-geomembrana, usualmente la evolvente de resistencia es extrapolada hasta alcanzar los esfuerzos requeridos, tal como se observa en la Figura 6.
- Cuando se utiliza envolventes lineales, la extrapolación de la envolvente proporcionará una sobre estimación de los factores de seguridad de pilas de gran altura, mientras que la utilización de una envolvente de resistencia no lineal, si bien proporcionará menores factores de seguridad, los resultados serán más confiables; sin embargo, los resultados del análisis de estabilidad en este caso dependerán de la posición del último valor obtenido en el ensayo de corte directo a gran escala.
- En la Figura 6 se presenta un resultado "ficticio" del ensayo de corte directo a gran escala que se obtendría para un esfuerzo normal de aproximadamente 1400 kPa, muy por encima de la capacidad del equipo utilizado, pero que

ilustra de manera aproximada como sería la envolvente de resistencia en este rango de esfuerzos. Como se puede observar, la diferencia entre el comportamiento lineal y no lineal es significativa; los factores de seguridad a ser obtenidos mostrarán también esta diferencia.

- Esta diferencia será aún mayor si se considera que el mineral de la pila tendrá un comportamiento también no lineal para altos niveles de esfuerzos, lo cual es típico para materiales granulares.
- La resistencia cortante de la interface para altos esfuerzos normales puede ser extrapolada de una forma más aproximada para el caso de envolvente no lineal, si se realiza un “ajuste arbitrario” de la resistencia cortante del último resultado del ensayo, reduciendo ligeramente este valor, con la finalidad de no sobreestimar los factores de seguridad para pilas de gran altura.

4.2 Resistencia Cortante de la Interface para Bajos Esfuerzos Normales

El análisis del primer banco de una pila de lixiviación, que es cuando se presentan bajos esfuerzos normales, es importante en la medida que típicamente se obtienen menores factores de seguridad. El criterio utilizado para la definición de la envolvente de resistencia no lineal a bajos niveles del esfuerzo normal, considera una resistencia cortante nula para un esfuerzo normal igual a cero, tomando entonces el punto (0,0) como inicio de la envolvente de resistencia.

En la Figura 7 se presentan los resultados de un ensayo de interface suelo-geomembrana considerando un valor mínimo de 50 kPa del esfuerzo normal utilizado en el ensayo. Como se puede observar, el resultado para este nivel de esfuerzos normales confirmaría el criterio de usar el origen de coordenadas como el inicio de la envolvente de resistencia.

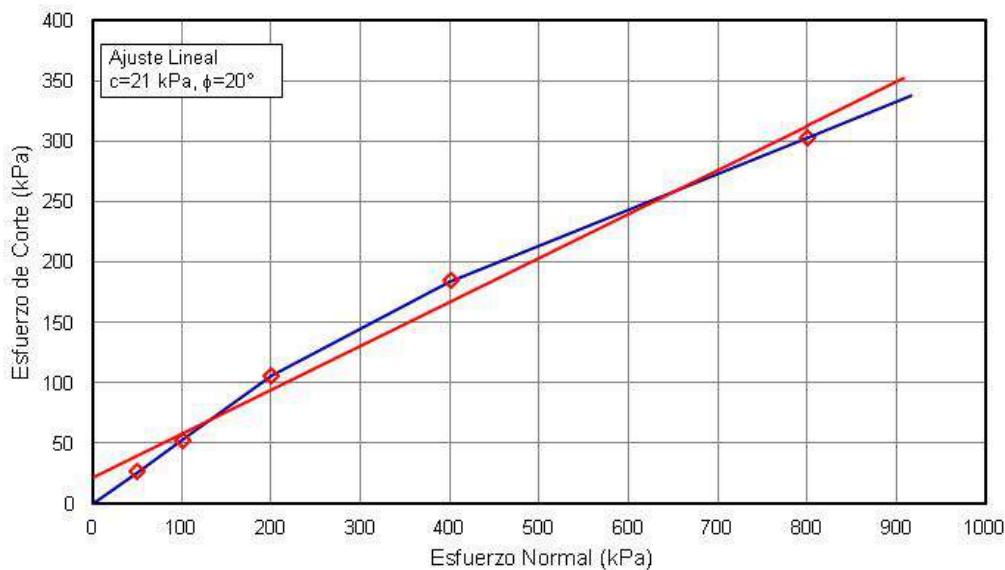


Figura 7. Resistencia cortante para bajos esfuerzos normales.

5. CONCLUSIONES

Se ha revisado una extensa base de datos de 126 resultados de ensayos de corte directo a gran escala realizados en interface suelo arcilloso de baja permeabilidad con geomembrana lisa y texturada de LLDPE y HDPE, de 1,5 y 2,0 mm de espesor. La mayoría de estos ensayos fueron realizados con geomembrana texturada de LLDPE, utilizada con mucha frecuencia en el diseño de pads de lixiviación; los resultados indican un comportamiento predominantemente no lineal de la envolvente de resistencia.

El estudio comparativo realizado para evaluar la influencia de la no linealidad de la envolvente de resistencia de la interface suelo-geomembrana en la estabilidad pilas de lixiviación típicas, consideró lo siguiente: dos casos reales de envolvente de resistencia no lineal tomada de la base de datos revisada; casos hipotéticos de pilas de lixiviación de diferentes alturas; y pendientes de la base de 2 y 4%, también típicas. Los resultados de los análisis realizados con envolvente de resistencia no lineal proporcionan menores factores de seguridad que los análisis con envolvente lineal para el análisis del primer banco de la pila (10 m de altura) y de pilas de alturas mayores a 150 m, debido fundamentalmente a la diferencia de la resistencia

cortante de las envolventes lineal y no lineal que se observa para los esfuerzos normales promedio en la superficie de falla a lo largo de la interface para cada altura analizada.

El esfuerzo normal promedio para pilas de altura iguales o mayores a aproximadamente 150 m, excede el rango del esfuerzo normal máximo utilizado usualmente en ensayos de corte directo a gran escala, por lo que para el análisis de pilas de gran altura es necesario extrapolar la envolvente de resistencia hasta alcanzar los esfuerzos requeridos. Esta extrapolación proporcionará una sobreestimación de los factores de seguridad de pilas de gran altura; sin embargo, la utilización de una envolvente de resistencia no lineal proporcionará resultados más confiables, con factores de seguridad menores que en el caso de considerar envolvente lineal, pudiendo ser mejorada con un "ajuste arbitrario" de la resistencia cortante del último resultado del ensayo, evitando así la sobreestimación de los factores de seguridad de pilas de gran altura.

REFERENCIAS

- ASTM D 5321. Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Breitenbach, A.J., and Swan Jr., R.H. (1999). Influence of high load deformations on geomembrane liner interface strengths. *Geosynthetics '99 Conference*, Industrial Fabrics Association International, Boston, Massachusetts, Vol. 1, pp. 517-529.
- Ghazavi, M. and Ghaffari, J. (2008). Experimental determination of sand-geosynthetic interface parameters using large direct shear tests. *The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition*, pp. 570-576.
- Koerner, R.M. and Koerner G.R. (2007). Interpretation(s) of laboratory generated interface shear strength data. GRI White Paper #10, Geosynthetic Institute 475 Kedron Avenue Folsom, PA 19033 USA.
- Parra, D., Soto, C. and Valdivia, R. (2010). Soil liner-geomembrane interface shear strength using rigid substrata or overliner. *9th International Conference in Geosynthetic*, pp. 747-750.
- Rocscience (2005). SLIDE: 2D Limit Equilibrium Slope Stability for Soil and Rock Slopes. User's Guide.