

Settlement Analysis of a Heap Leach Pad Founded over an Old Open Pit

J. Ccotohuanca, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
J. Ale, Wood PLC, Lima, Perú

RESUMEN

Como resultado de una expansión del yacimiento de una unidad minera (con explotación subterránea y a cielo abierto) ubicada en Bolivia, se ha requerido la construcción de una pila lixiviación sobre un relleno de desmonte dentro de un tajo abierto antiguo. El material de desmonte de mina tiene un espesor de material no consolidado de 55 m. Debido a la naturaleza poco consolidada del material de desmonte y a la presencia de labores subterráneas, existe la preocupación acerca del asentamiento que se presentaría en la fundación de la pila de lixiviación. Este asentamiento puede comprometer la funcionalidad del sistema de colección de solución y la integridad del sistema de revestimiento. Un extenso programa de investigaciones geotécnicas que incluyeron: ensayos geofísicos (MASW, MAM, refracción sísmica y pruebas de resistividad eléctrica), ensayos de laboratorio y perforaciones diamantinas; fue llevado a cabo a fin de desarrollar un análisis de asentamientos. El presente artículo presenta el análisis de asentamientos inmediatos de la pila de lixiviación fundada en un material de desmonte de mina no consolidado usando el método de elementos finitos (FEM). Se determinan los asentamientos totales y diferenciales sobre el sistema de revestimiento, para evaluar la capacidad de la geomembrana LLDPE (polietileno de baja densidad) a la deformación debido a los asentamientos diferenciales. Finalmente, se compararon los resultados con criterios de tolerabilidad disponibles (Kavazanjian, et al. 2014) y mediante el concepto de co-energía (Giroud, 1994; Giroud et al., 1995).

ABSTRACT

As a result of an expansion of the ore deposit in a mine operation (underground and open pit mining), the construction of a heap leach facility founded on a mine-waste-filled open pit has been required. Due to the poorly consolidated nature of the waste material and the presence of underground openings, there is concern about the settlement that would be presented at the foundation of the heap leach facility. This settlement may compromise the serviceability of the solution collection system and the integrity of the liner system. This paper presents the analysis of immediate settlements of the heap leach facility based on the deformation of the mine waste material (loose material) with FEM (Finite Element Method). To evaluate and compare the abilities of LLDPE geomembrane to withstand differential settlements the co-energy concept (Giroud, 1994; Giroud et al., 1995) and comparisons with available tolerance criteria (Kavazanjian, et al. 2014) were applied.

1. INTRODUCCIÓN

En vista del uso común de las pilas de lixiviación en la industria minera, el buen desempeño de esta estructura es críticamente importante, en especial, el sistema de colección de solución. La necesidad de un buen diseño desde el punto de vista económico y ambiental se ha vuelto esencial.

De acuerdo con Lupo (2005), la comprensión del comportamiento de los sistemas de revestimiento en pilas de lixiviación ha evolucionado en respuesta a varios factores: el entendimiento de la respuesta a largo plazo de los geosintéticos bajo cargas elevadas y condiciones ambientales muy severas; el diseño, construcción y operación de pilas de lixiviación con cargas significativas de mineral apilado (hasta 3 MPa); la construcción de pilas de lixiviación sobre terrenos con gran variabilidad espacial de los materiales de fundación; el desarrollo de mejores técnicas de colección de solución para una mejor recuperación y; el compromiso de las compañías mineras con los estándares ambientales locales, nacionales e internacionales.

En los últimos años, debido a falta de espacio en la propiedad o límites de concesión en algunas operaciones mineras, se ha convertido en una práctica común, la construcción de pilas de lixiviación sobre instalaciones geotécnicas existentes, tales como: depósitos de desmonte de mina y depósitos de almacenamiento de relaves (que representan *a priori* condiciones desfavorables como fundación). Desafortunadamente, como afirma Lupo (2005), las condiciones ideales de fundación rara vez se encuentran, más aún en unidades mineras con límites de propiedad reducidos.

A pesar de esto, la ingeniería geotécnica ha presentado experiencias exitosas de diseño y construcción de pilas de lixiviación sobre depósitos de desmonte de mina. Casos históricos en la minería peruana son documentados en Mantilla, et al. (2016) y García, et al. (2015). Este último, respalda el diseño presentado mediante registros de monitoreo de

asentamientos durante la operación de la pila de lixiviación, indicando que asentamientos totales de hasta 5,25 m (para una altura de apilamiento de 120 m) no comprometieron la serviciabilidad del sistema de revestimiento.

En contraste, un caso de estudio presentado por Van Zyl (1987), demuestra que, bajo ciertas condiciones geotécnicas, resulta viable concebir pilas de lixiviación sobre materiales blandos, tales como los relaves convencionales.

El presente artículo complementa los casos históricos. Se presenta un caso de estudio de una pila de lixiviación propuesta a ser construida sobre un material de desmonte de mina poco compacto, que se encuentra rellenando un antiguo tajo abierto con labores de minería subterránea en su parte inferior. Se destaca el entendimiento de la componente de la fundación y sistema de colección de solución. En adición, se desarrolla el análisis de asentamientos inmediatos con el FEM (método de elementos finitos) a fin de determinar los posibles efectos del asentamiento y evaluar la capacidad de servicio del sistema de colección de solución y la integridad del sistema de revestimiento. Finalmente, se comparan las capacidades de la geomembrana LLDPE para soportar asentamientos diferenciales, mediante el concepto de co-energía (Giroud, 1994; Giroud et al., 1995) y criterios de tolerabilidad disponibles (Kavazanjian, et al. 2014).

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio presentado es una pila de lixiviación localizada en Bolivia, con una capacidad de apilamiento de 2 Mm³ de toneladas de mineral de oro en óxidos. El mineral a lixiviar consiste en un material que contiene partículas granulares de baja a mediana resistencia propensos a generar una gran cantidad de finos, por lo que su disposición dentro la pila de lixiviación considera la aplicación de aglomerantes a fin de facilitar el proceso de lixiviación.

Debido a la falta de espacio, el emplazamiento de la pila de lixiviación se ha proyectado sobre un material de desmonte de mina no compacto de 55 m de espesor (que rellena un tajo antiguo). Se identificaron varios problemas de ingeniería civil y geotécnica involucrados a esta configuración, los que se listan a continuación:

- Alta aleatoriedad de las propiedades de resistencia y elasticidad del material de fundación (desmonte de mina) debido al poco control en el llenado de desmonte dentro del antiguo tajo.
- La compresibilidad del material de desmonte de mina poco compacto, con relación con las demandas de carga del mineral apilado. Esto podría afectar la recuperación de la solución rica, a través del sistema de colección.
- Riesgo de subsidencia debido a las galerías subterráneas en el fondo del tajo.
- Selección de un revestimiento que podría tolerar las deformaciones esperadas.
- Riesgo de niveles de humedad y compresibilidad elevados del mineral apilado que pueden producir la rotura de la estructura del mineral aglomerado y, por tanto, una condición de bajo drenaje y baja capacidad de disipar la presión de poros con detrimento de la estabilidad del apilamiento.

Se consideró que la principal preocupación de la estructura de lixiviación es la generación de asentamientos en el material de fundación (de desmonte) debido al apilamiento de mineral. Los asentamientos podrían impactar directamente en la funcionalidad del sistema de colección de solución y sistema de revestimiento.

3. EVALUACIONES GEOTÉCNICAS

3.1 Modelo Geotécnico

El análisis de la información proveniente de las perforaciones diamantinas e investigación geofísica indicó que la fundación está compuesta superficialmente por un material gravoso (desmonte grueso con bolones de 8" de tamaño máximo) de 10 m de espesor, que sobreyace a un suelo fino arenoso (desmonte fino) de 45 m de espesor. Asimismo, se encontró que las velocidades de ondas de corte (V_s) y de ondas de compresión (V_p) son crecientes con el nivel de confinamiento lo que sugiere un adecuado comportamiento del material en profundidad. La Figura 1 presenta una vista de los perfiles de tomografía eléctrica donde se distingue la forma cónica invertida típica de la cara externa de los taludes del tajo abierto. La Figura 2 presenta la sección geotécnica típica que integra todas las unidades geotécnicas que componen la pila de lixiviación del caso de estudio.

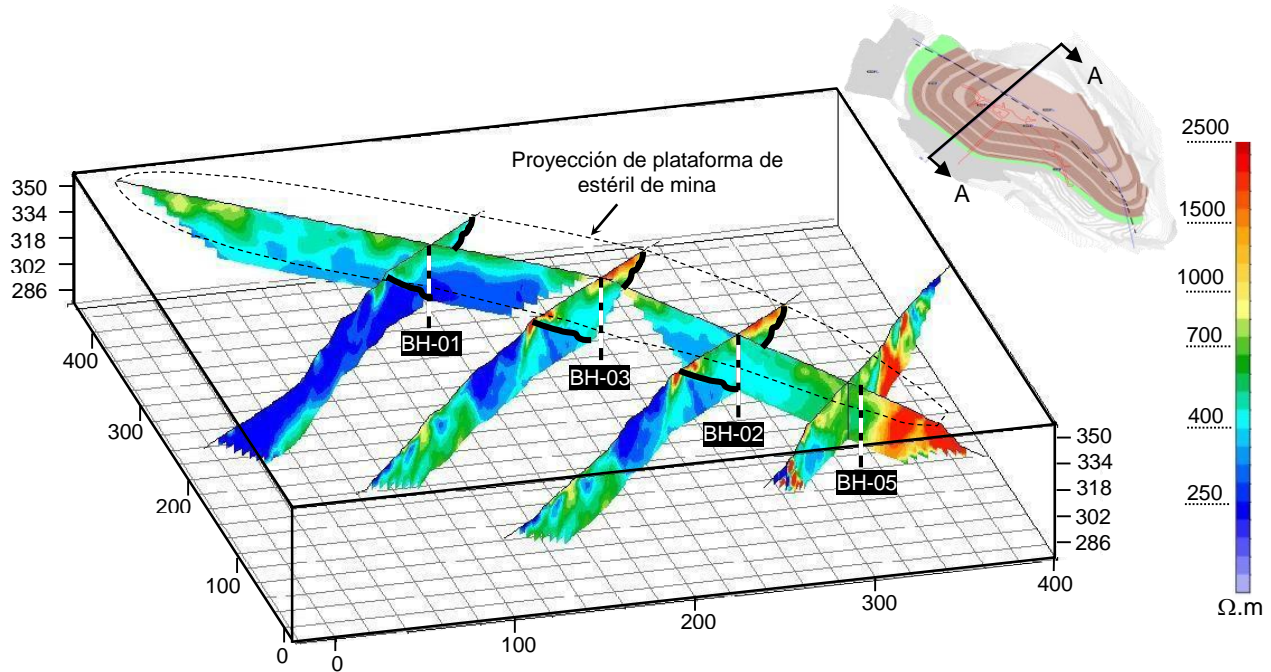


Figura 1. Perfiles geofísicos de tomografía eléctrica y proyección de perforaciones

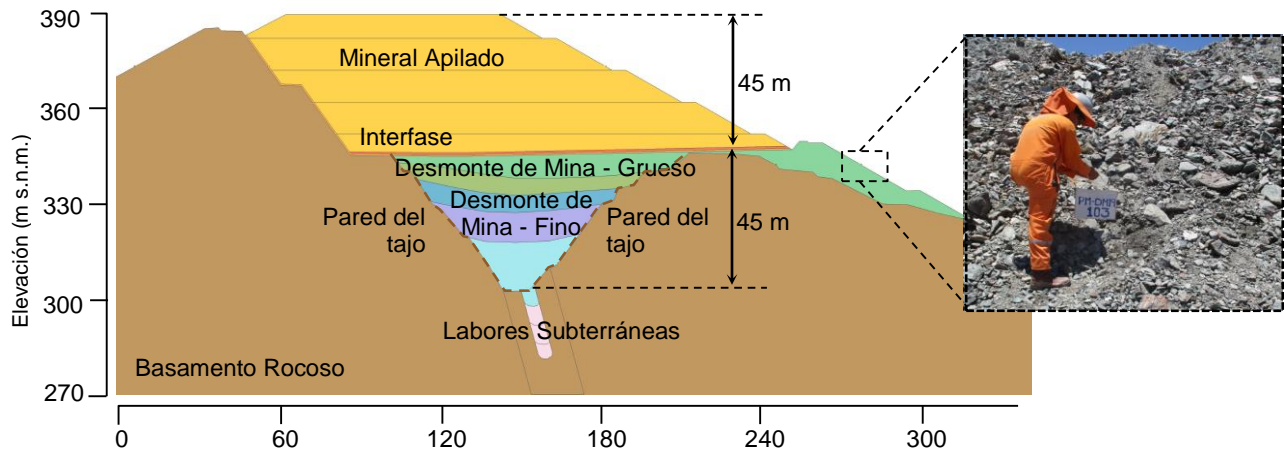


Figura 2. Modelo geotécnico y fotografía del material de desmante de mina

3.2 Caracterización Geotécnica

La caracterización geotécnica del caso de estudio incluye la determinación de 6 unidades geotécnicas. Para los propósitos del presente artículo, la evaluación de la caracterización geotécnica se enfocará solo en el desmante de mina que constituye la fundación de la pila de lixiviación. El desmante de mina consiste en un material grueso en sus primeros 10 m y, fino en los siguientes 45 m. El desmante de mina grueso contiene partículas de hasta 200 mm (8"), por lo que las pruebas de laboratorio se efectuaron utilizando la matriz fina y aplicando metodologías de escalamiento de partículas, tales como: granulometrías paralelas (Lowe, 1964) y método de corte (Al-Hussaini, 1983). Estas técnicas están destinadas a lograr que los parámetros de resistencia al corte y elásticos sean semejantes entre el modelo (muestra escalada) y prototipo (muestra original).

En la práctica, destaca el método de granulometría paralelas debido a exitosos resultados en materiales fluviales (Gesche, 2002; De la Hoz, 2007), materiales de alta resistencia como el balasto (Jernigan, 1998; Cambio & Ge, 2007) y rocas sedimentarias como enrocados de caliza (Hu et al., 2011), sin embargo, su aplicación se sustenta en la verificación de cinco requisitos (Lowe, 1964; De la Hoz, 2007; Dorador, 2010): (1) Las granulometrías de las muestras modelo no deben contener más de 10% de contenido de finos (pasantes malla #200), (2) los coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura

(Cc) deben mantenerse similares entre los modelos y el prototipo así como (3) la mineralogía y resistencia de las partículas, (4) la rugosidad y forma de las partículas y, (5) la densidad, donde el escalamiento implica una corrección por contenido de partículas de sobre-tamaño según el estándar ASTM D4718.

La verificación de los requisitos para el caso del desmonte de mina, se presenta a continuación:

- (1) De acuerdo con las curvas granulométricas del prototipo y modelo presentadas, en la Figura 3, se ha fijado el máximo contenido de finos hasta 10%, a fin de verificar este requisito.
- (2) Como consecuencia de la fijación del contenido de finos, las curvas granulométricas del modelo y prototipo no resultan perfectamente paralelas (Cc y Cu ligeramente distintos), ver Tabla 1.
- (3) Los resultados de ensayos de carga puntual indicaron resistencias a la compresión uniaxial de las partículas variable entre 70 MPa y 109 MPa con un promedio de 86 MPa, evidenciando un ligero contraste entre las resistencias de las partículas.
- (4) De la fotografía de la Figura 2 se aprecia que las partículas de menor y mayor tamaño del desmonte de mina están conformadas predominantemente por partículas angulares, asimismo, considerando su naturaleza producto de voladura, se estima una similar rugosidad.
- (5) Las muestras enviadas al laboratorio se construyeron con base en la densidad *in-situ* del material y considerando una corrección por sobre-tamaño según el estándar ASTM D4718.

La Figura 3 presenta las curvas de distribución granulométrica del prototipo y los modelos usando los métodos de granulometrías paralelas y de corte. Se aprecia en la Figura 3 que la curva granulométrica del método de corte es menos gradada en contraste con la curva del método de granulometrías paralelas.

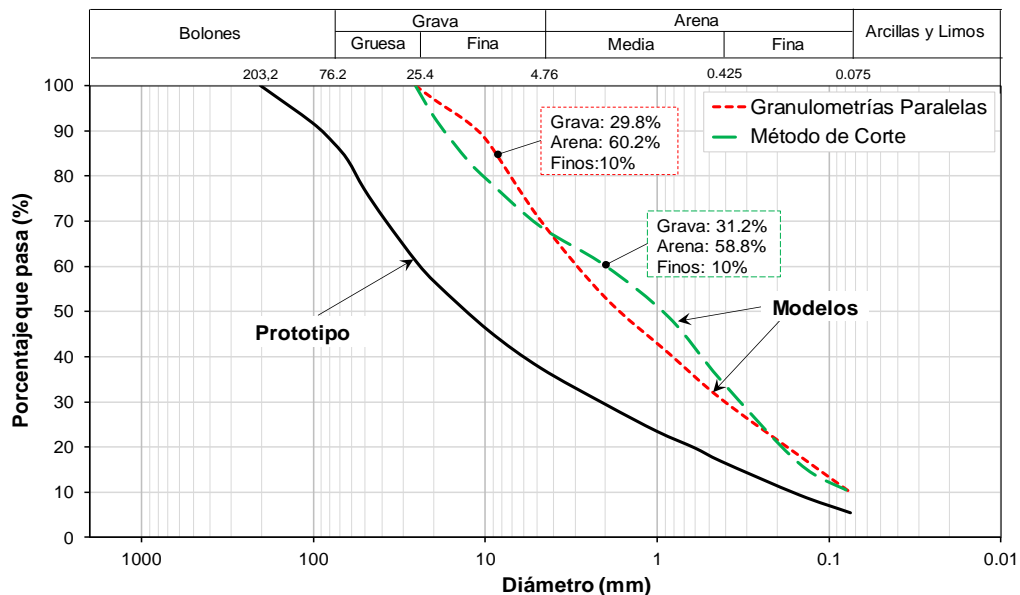


Figura 3. Curvas de distribución granulométrica del prototipo y modelos del método de granulometrías paralelas y corte

Considerando la evaluación de los 5 criterios para la aplicación de la metodología de granulometrías paralelas, el material de desmonte de mina cumple parcialmente con los requerimientos. De acuerdo con Dorador (2010), se espera resultados conservadores en la resistencia al corte y en la rigidez.

Tabla 1. Diámetros Representativos (D₁₀, D₃₀, D₆₀) y Coeficientes C_c y C_u

Material	Curva	Tamaño máximo (mm)	Diámetros Representativos (mm)			C _u	C _c	Factor de escala ¹
			D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀			
Desmonte de Mina	Prototipo	203,2 (8")	0,169	2,172	23,898	141,76	1,17	-
	Modelo Paralelo	25,4 (1")	0,075	0,410	3,114	41,52	0,72	8,0
	Modelo de Corte	25,4 (1")	0,075	0,353	1,984	26,45	0,84	-

¹Tamaño máximo de partícula en campo (prototipo) dividido con el tamaño máximo de partícula del modelo.

Con fines comparativos, el desmante de mina fue reconstituido en laboratorio para llevar a cabo ensayos de compresión triaxial no drenados (CU) tanto con la muestra del método de corte y de granulometrías paralelas. Se fijó la densidad (2,0 g/cm³) y el contenido de humedad (5%) basados en el estándar ASTM D4718. Los resultados en términos de trayectorias p-q de esfuerzos efectivos, esfuerzos desviadores y módulos de elasticidad E₅₀ se presentan en la Figura 4.

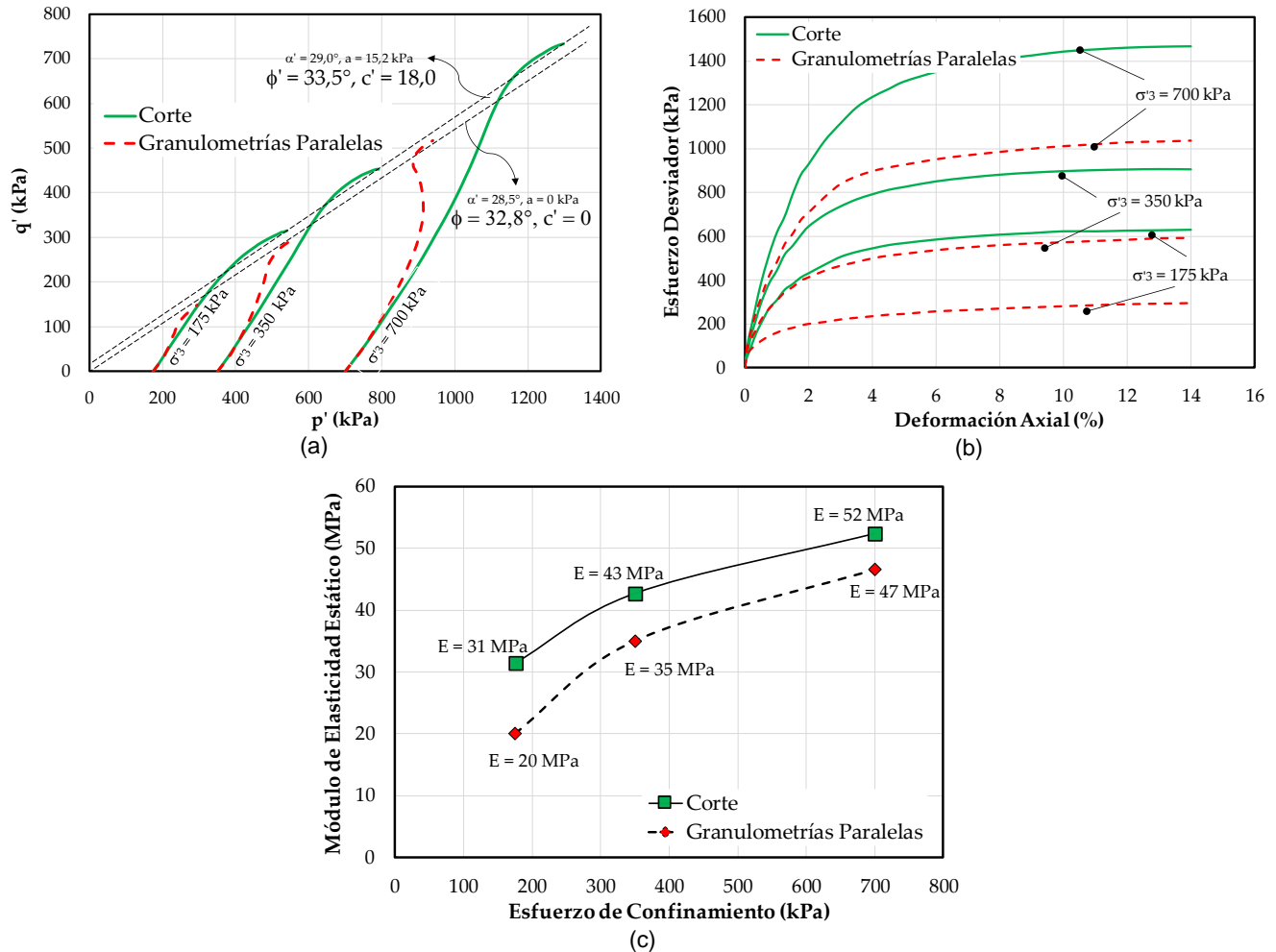


Figura 4. (a) Trayectorias p-q de esfuerzos efectivos, (b) Trayectorias de esfuerzos desviadores, (c) Módulo de elasticidad secante E₅₀ vs esfuerzos de confinamiento

De acuerdo con los resultados, los parámetros de resistencia bajo el enfoque de la metodología de corte son menos conservadores respecto al método de granulometrías paralelas. Se ha considerado que los parámetros de este último son los más representativos, considerando la mayor similitud entre las muestras modelo y prototipo.

Basados en que el desmante de mina grueso está sometido a niveles de confinamiento inferiores a 350 kPa, se ha establecido el módulo de elasticidad obtenido para dicho nivel de esfuerzo, es decir, un promedio de 35 MPa. Los resultados obtenidos a partir del ensayo de compresión triaxial CU se compararon con lo obtenido a través de correlaciones de los registros de las investigaciones geofísicas. Considerando que el material de desmante grueso presenta velocidades de ondas de corte (Vs) variable entre 250 m/s y 300 m/s y, velocidades de ondas compresivas (Vp) entre 530 m/s y 640 m/s, se ha calculado un módulo de elasticidad secante promedio (E₅₀) de 35 MPa, así como una relación de Poisson promedio (ν) de 0,30. Los resultados se han coincido para una relación de los módulos de elasticidad dinámico (E_{DIN}, de los ensayos geofísicos) y estático (E_{EST}, de los ensayos triaxiales) de 11,5 (E_{DIN}/E_{EST}). Para los estratos correspondientes al desmante de mina fino se ha mantenido la relación obtenida.

La Tabla 2 resume los parámetros de resistencia al corte y elasticidad de las unidades geotécnicas que componen la pila de lixiviación del caso de estudio.

Tabla 2. Propiedades geotécnicas de los materiales

Material	Mod. Con.	Peso Unitario (kN/m ³)		ϕ' (°)	c' (kPa)	m ²	E ₅₀ ³ (MPa)			ν
		γ_T (kN/m ³)	γ_{SAT} (kN/m ³)				E ₅₀ ^{ref}	E _{oed} ^{ref}	E _{ur} ^{ref}	
Mineral Apilado	HS	1		34,5	0	0,52	40	40	80	0,30
Interfaz ⁴	M-C	20,0 ⁵		21,0	18,0	15,0	-	60	-	-
Desmante de Mina Grueso	M-C	22,0	23,0	34,0	0	-	35	-	-	0,30
Desmante de Mina Fino – 1	M-C	21,0	22,0	33,0	0	-	50	-	-	0,30
Desmante de Mina Fino – 2	M-C	21,0	22,0	33,0	0	-	70	-	-	0,30
Desmante de Mina Fino – 3	M-C	21,0	22,0	33,0	0	-	90	-	-	0,30
Desmante de Mina Fino – 4	M-C	21,0	22,0	33,0	0	-	120	-	-	0,30
Basamento Rocoso	LE	25,0	26,0	7		-	750	-	-	0,24
Labores Subterráneas ⁸	M-C	12,0	12,0	2,0	5,0	-	0,1	-	-	0,45

¹ Variable con la altura de carga de mineral apilado

² Exponente de dependencia entre la rigidez y nivel de esfuerzos confinantes

³ Módulo de elasticidad estático

⁴ Interfaz geomembrana/soil liner, modelado con base en un factor de reducción de rigidez y resistencia (Ri) de 0,6

⁵ Peso unitario correspondiente al soil liner

⁶ Establecido por *default* al modelar interfazs en PLAXIS

⁷ Parámetros GSI de 55, mi = 10, UCS de 30 MPa y D = 0 para el modelo generalizado de resistencia de Hoek & Brown

⁸ Establecido con fines del modelamiento numérico y asignándose parámetros muy reducidos

HS: Hardening soil.

M-C: Mohr Coulomb

LE: Lineal Elástico

E₅₀^{ref}, E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}: Módulos de elasticidad secante, oedométrico y de recarga referenciales al modelo HS.

4. ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS

El análisis de deformaciones se realizó empleando el programa de cómputo Plaxis 2D V.2017, mediante FEM. El análisis ha considerado las siguientes etapas:

- Etapa 0: Generación de las tensiones iniciales (método de *gravity loading*).
- Etapa 1 a Etapa 3: Activación de los elementos tipo *plate* en las paredes de las labores subterráneas que simulan posibles trabajos de sostenimiento.
- Etapa 4 a Etapa 8: Simulación de la secuencia de llenado del material de desmante en capas no uniformes previamente establecidas.
- Etapa 9 a Etapa 13: Aplicación de cargas de mineral en capas conformadas por banquetas de 10,0 m de altura cada una (cada banqueta incluye *lifts* de 2,5 m de altura).

Una vista en planta y perfil de la sección analizada se presenta en la Figura 2. El tamaño del modelo es de 340 m de ancho y 160 m de altura y presenta 8822 elementos y 71804 nudos en arreglos de elementos triangulares de 15 nudos.

4.1 Asentamientos Totales

El *grading* inicial de nivelación de la fundación se estableció en 1% y 2% hacia la dirección del sistema de colección y, en 2,0% a lo largo del canal principal de colección. La Figura 5, ilustra la configuración geométrica del *grading*.

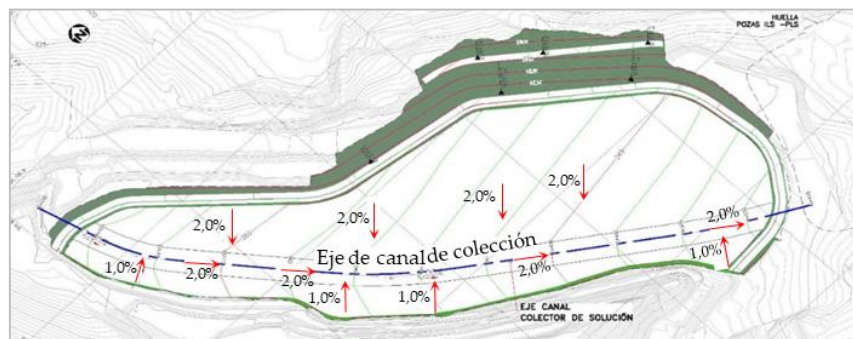


Figura 5. Grading de nivelación de la fundación de la pila de lixiviación

La Figura 6 presenta los resultados de asentamientos en la interfaz (geomembrana), el asentamiento máximo esperado es de 0,31 m, debajo de la zona donde se alcanza la mayor altura de apilamiento de mineral. Asimismo, un análisis de los asentamientos a lo largo del sistema de revestimiento (geomembrana), da cuenta de una variación del *grading* de la fundación. Como se esperaba, el *grading* de la fundación tiene una pequeña variación (en los asentamientos) en zonas con poca carga de mineral en contraste con las zonas de mayor carga, esto ocasiona que en algunas zonas se produzca una reducción del *grading* inicial y en otras, un incremento, el efecto en mención se ilustra en la Figura 6, donde la línea continua representa la geometría inicial del *grading* de la fundación y la línea discontinua, la geometría final. Se puede apreciar una variación de 1,0% a 2,0%, en la zona más cercana a la pared del tajo y, de 2,0% a 1,4%-2,2%-1,9%, en el sector opuesto.

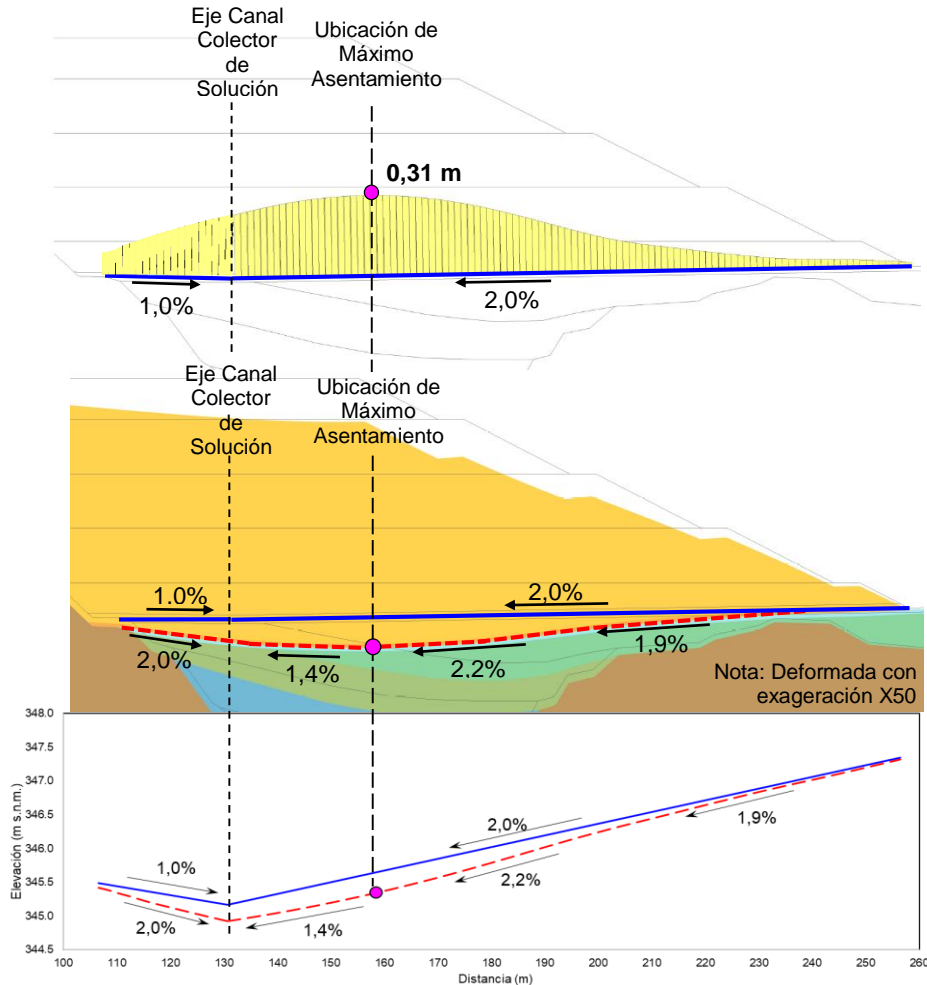


Figura 6. Asentamientos a lo largo del sistema de impermeabilización y comparación del *grading* inicial y final

A pesar de las variaciones de la geometría del *grading* de la fundación debido a los asentamientos, estos no son suficientes para impactar en la funcionalidad del sistema de colección de solución (*gradings* mayores a 1,0%), es decir, no se afectaría la colección de solución de mineral durante la operación de la pila de lixiviación. Por lo tanto, la geometría inicial del *grading* (ver Figura 5) cumple con su función.

4.2 Asentamientos Diferenciales

La integridad de la geomembrana se ha verificado mediante un análisis de los asentamientos diferenciales. El análisis ha considerado la diferencia de asentamientos entre las combinaciones de los puntos de control (A, B, C y D), definidos según se muestra en la Figura 7; donde se ha calculado la razón de asentamiento. La Figura 7, resume los asentamientos diferenciales (Δ), la distancia entre los puntos de control (L), y la razón de asentamiento (R.A.).

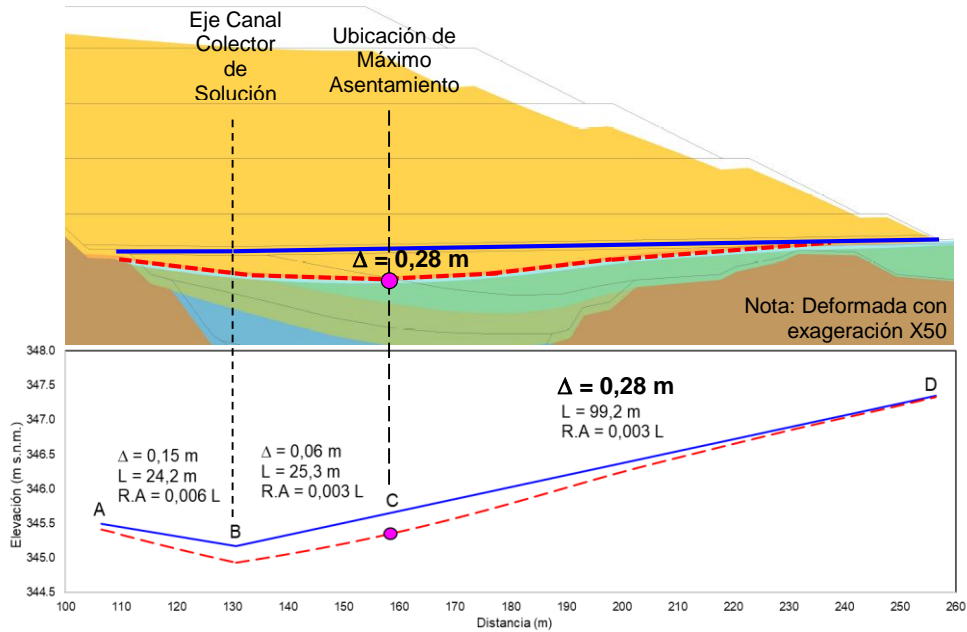


Figura 7. Determinación de asentamientos diferenciales

4.3 Evaluación de la Capacidad de la Geomembrana para Tolerar Asentamientos Diferenciales

4.3.1. Evaluación Teórica Mediante el Concepto de Co-energía

El concepto de co-energía fue introducido por Giroud (1994). La teoría sostiene que una geomembrana puede resistir con éxito asentamientos diferenciales si la co-energía de la geomembrana requerida (E_{req}^{co}) debido al asentamiento diferencial es menor a la co-energía permitida de la geomembrana (E_{max}^{co}). Las expresiones para E_{req}^{co} y E_{max}^{co} se definen según las ecuaciones 1 y 2, respectivamente:

$$E_{req}^{co} = s p \tan \delta \quad [1]$$

Donde, s , corresponde al valor del asentamiento diferencial esperado para un valor dado de presión aplicada, p , y un ángulo de fricción de la interfaz suelo-geomembrana, δ .

$$E_{max}^{co} = \int_0^{T_{max}} \varepsilon dT \quad [2]$$

Gráficamente, E_{max}^{co} , representa el área delimitada por la curva esfuerzo-deformación de una geomembrana hasta la línea horizontal correspondiente al esfuerzo máximo T_{max} .

La determinación de la co-energía permitida para la geomembrana LLDPE de 1.5 mm del caso de estudio se presenta en la Figura 8, donde se obtiene un valor de E_{max}^{co} de 83 kN/m. Por otro lado, la co-energía requerida E_{req}^{co} se ha calculado en 68 kN/m, en función del asentamiento diferencial s igual a 0.28 m (ver Figura 7) generado por la aplicación de la carga de mineral apilado p de 650 kPa (equivalente a la máxima carga) y los resultados de ensayos de corte directo a gran escala en la interfaz suelo-geomembrana, llevado a cabo según el estándar ASTM D5321, donde se ha obtenido un valor de δ de 20.5° (ver Figura 9).

Con base en los resultados de co-energía, se ha determinado un factor de seguridad (FS) de la geomembrana con respecto a su capacidad para resistir asentamientos diferenciales. La expresión se muestra en la ecuación 3.

$$FS = \frac{E_{max}^{co}}{E_{req}^{co}} \quad [3]$$

Se ha obtenido un factor de seguridad igual 1.22, que indicaría que, bajo las condiciones descritas para el caso de estudio, la geomembrana LLDPE de 1.5 mm, propuesta a ser colocada como sistema de revestimiento, es capaz de soportar el máximo asentamiento diferencial calculado.

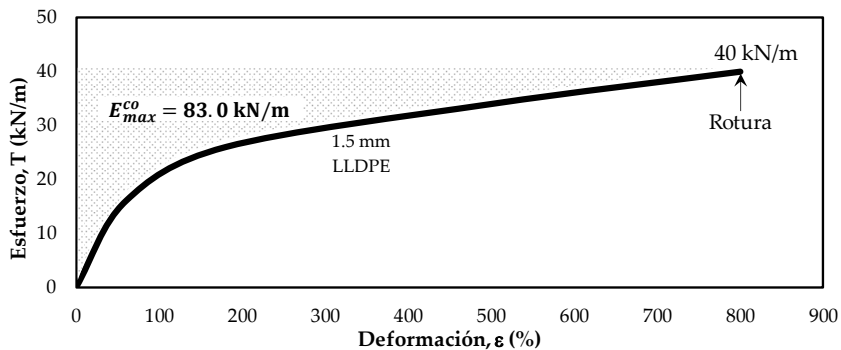


Figura 8. Determinación de la co-energía permitida de la geomembrana LLDPE 1.5 mm

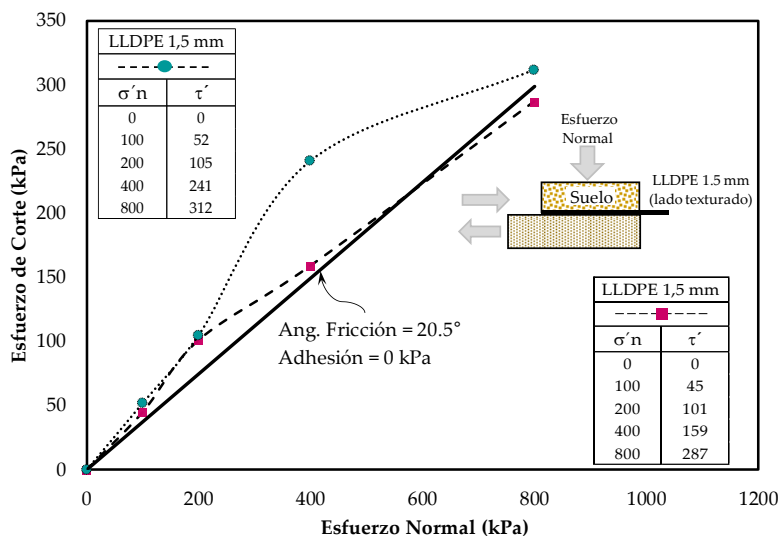


Figura 9. Cálculo del ángulo de fricción de la interfaz suelo-geomembrana

4.3.2. Evaluación Práctica

Los criterios de asentamientos tolerables en sistemas conformados por geosintéticos (geomembrana) fueron generalmente desarrollados para "landfills" los cuales son estructuras similares a las pilas de lixiviación. Debido a que en Bolivia no hay una norma que especifique la magnitud de los asentamientos para el revestimiento de una pila de lixiviación, en la práctica, se tolera asentamientos diferenciales entre 0,15 m a 0,50 m (Kavazanjan, et al. 2014). Aplicándose el criterio más riguroso para zonas con cambios abruptos en la geometría de fundación de una pila, donde el revestimiento es más vulnerable a posibles fallas. En el presente artículo estos factores no son aplicables dado que la pila de lixiviación del caso de estudio se funda sobre un área grande y relativamente uniforme, además, los asentamientos calculados son uniformes a lo largo de la interfaz. Por lo tanto, considerando lo anteriormente expuesto, el máximo asentamiento diferencial esperado en la pila de lixiviación (0,28 m), no comprometería la integridad del sistema de revestimiento.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente artículo ha presentado el análisis de asentamientos inmediatos de una pila de lixiviación fundada sobre un material de desmonte de mina no compactado. El estudio ha destacado el entendimiento de la componente de la fundación como condicionante del diseño del sistema de revestimiento.

Se han aplicado herramientas de modelamiento geotécnico que han demostrado ser útiles para acoplar asentamientos en el diseño de sistemas de revestimiento, permitiendo la verificación de la capacidad de estas estructuras para soportar asentamientos diferenciales. Los cálculos de asentamientos permiten a los diseñadores decidir sobre la geometría de la pila de lixiviación, que asegure la integridad de la geomembrana. En el presente estudio el plan de nivelación (*grading*) inicial de la superficie de la fundación fue validada y, por tanto, no requirió modificaciones.

A pesar que el máximo asentamiento diferencial esperado en la interfaz de la pila de lixiviación resulta en 0,28 m. Se demostró, con base en la aplicación del concepto de co-energía (Giroud, 1994; Giroud et al., 1995), que el asentamiento

es tolerable y no comprometería la integridad del sistema de revestimiento (geomembrana LLDPE de 1.5 mm). Además, debido a que la plataforma de lixiviación de mineral se funda sobre un área grande y con topografía favorable al desarrollo de asentamientos relativamente uniformes a lo largo del sistema de revestimiento, se espera un comportamiento adecuado de la estructura. Cabe indicar que, en la práctica, es admitido asentamientos diferenciales de hasta 0.30 m como criterio de tolerabilidad, basados en experiencias en *landfills* que son estructuras semejantes a las pilas de lixiviación (Kavazanjian et al. 2014).

El estudio es particularmente importante, dado que aborda las condiciones probables de las actuales operaciones mineras que carecen de espacio y que obligan a la construcción de estructuras mineras sobre estructuras existentes a manera de optimizar espacios y reducir impactos ambientales.

Cabe destacar el papel de la caracterización geotécnica, basado en un extenso programa de investigaciones geotécnicas. En el presente estudio, se puso especial atención a la caracterización del desmonte de mina, componente crítico en el cálculo de asentamiento. Se evaluó la influencia de los métodos de escalamiento de partículas más conocidos (corte y granulometrías paralelas). Estableciéndose este último como el más apropiado.

En general, se recomienda que el método de gradación paralela no solo se base en el escalamiento de la curva de distribución de tamaño de partículas, sino que también implique mantener al menos 5 requisitos para modelar "realmente" la resistencia al corte y parámetros elásticos del suelo prototipo. Finalmente, como medida de monitoreo y control, se sugiere la instalación de celdas de asentamiento de cuerda vibrante (*vibrating wire settlement cells*), a fin de calibrar el modelo numérico durante la construcción y operación de la pila de lixiviación, así como verificar las deformaciones esperadas calculadas por herramientas numéricas.

REFERENCIAS

- ASTM D 4718. Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D 5321. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear, *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Al-Hussaini, Mosaid, (1983). Effect of particle size and strain conditions on the strength of crushed basalt, *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 706-717.
- Cambio, D. and Ge, L. (2007). Effects of Parallel Gradation on Strength Properties of Ballast Materials, *Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior*.
- De La Hoz, K. (2007). Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos, Tesis de Magíster en Ciencias, Universidad de Chile.
- Dorador, L. (2010). Análisis experimental de las metodologías de curvas homotéticas y corte en la evaluación de propiedades geotécnicas de suelos, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Chile.
- García, F., Byers, T., Barreda, G., Urbina, D. (2015). Pilas de lixiviación sobre depósitos de desmonte, *Perumin 32 convención minera*, Arequipa, Perú.
- Gesche, R., (2002). Metodología de evaluación de parámetros de resistencia al corte de suelos granulares gruesos. Tesis de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Chile.
- Giroud, J.P. (1994) Quantification of Geosynthetic Behaviour, *Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol. 4, Singapore, pp. 1249-1273.
- Giroud, J.P. Soderman, K.L. (1995). Comparison of Geomembranes Subjected to Differential Settlement, *Geosynthetics International, Special Issue on Design of Geomembrane Applications*, Vol. 2, No. 6, pp. 953-969.
- Hu, W., Dano, C., Hicher, P.Y., Le Touzo, J.Y., Derx, F., Merliot, E. (2011) Effect of sample size on the behavior of granular materials" *Geotech. Test. J.* 34(3).
- Jernigan, R.L., (1998) The Physical Modeling of Soils Containing Oversized Particles, PhD Thesis Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder.
- Kavazanjian, E., Arab M., Matasovic, N. (2014). Performance based design for seismic design of geosynthetics-lined waste containment systems. *Maugeri M., Soccodato C. (eds) Earthquake Geotechnical Engineering Design. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 28. Springer, Cham*
- Lowe, J. (1964). Shear strength of coarse embankment dam materials, *Proceedings 8th Congress on Large Dams*, Vol. 3, pp 745 - 761.
- Lupo, J.F. (2005). Heap leach facility liner design, *Proceedings of the North American Geosynthetics Society (NAGS) / GRI19 Conference*, Las Vegas.
- Mantilla, H., Negrón, J. (2016). Total and differential settlement of a heap leach pad founded on an existing mine waste dump, *Proceedings of Heap Leach Mining Solutions, Lima, Peru*.
- Van Zyl, D. (1987). Geotechnical aspects of heap leach desing, Society of Mining Engineers, Colorado.