

La Historia de las Geomembranas en la Industria Minera

Breitenbach, A. J., P.E.

Vector Engineering, Golden, Colorado, USA

breitenbach@vectoreng.com

Smith, M. E., P.E., G.E.

Vector Engineering, Lima, PERÚ

smith@vectoreng.com

1 INTRODUCCIÓN

Los revestimientos de geomembranas han sido utilizados en la industria minera aproximadamente desde de 1970, como respuesta a las necesidades de revestimiento en pozas de evaporación, presas de relaves y pozas de lixiviación en pilas. Las presas de relaves han sido históricamente revestidas de tierra en su mayoría, pero el uso de revestimientos de geomembrana ha aumentado en los últimos años. Las pozas de evaporación y de lixiviación en pilas son las aplicaciones más grandes en las que se utiliza geomembranas en la minería, y por ende serán el principal objetivo de esta visión general de la historia de este tipo de revestimientos. Se tocará el tema del estado histórico de esta práctica, además de los intereses más importantes en el campo de la ingeniería y los problemas emergentes en el campo de la lixiviación en pilas.



Foto 1: Instalación de lixiviación en pilas en los Andes (150 has., área principal)

En la Foto N° 1 se puede observar un gran proyecto de lixiviación en pilas de relleno en un valle Andino.

2 35 AÑOS DE HISTORIA

2.1 Arcilla, geomembrana y revestimientos compuestos

El primer uso de geomembranas a gran escala en la minería se dio probablemente en las pozas solares de

Tenneco Minerals en Utah, EEUU, o en las de la Sociedad Química y Minera de Chile S.A. (SQM) en el Norte de Chile. Tenneco instaló 230 hectáreas (ha) en 1970, y las primeras instalaciones de SQM se llevaron a cabo aproximadamente durante el mismo tiempo y con el mismo tamaño. Antes de esto, su aplicación en la minería se daba mayormente en pequeñas pozas químicas.

Los primeros proyectos de lixiviación en pilas fueron instalaciones de lixiviación de botaderos de cobre, y en estas se utilizaba únicamente contención natural. Con el inicio de la lixiviación de oro y plata en pilas, en Montana y Nevada, EEUU, a mediados de los setentas, se introdujo el cianuro en la tecnología de la lixiviación en pilas y la contención natural ya no era políticamente (ni técnicamente) viable. En muchas de las primeras operaciones de oro y plata, construidas entre 1974 y 1983 en Nevada, se utilizaba revestimientos de tierra de baja permeabilidad, si bien para 1983 los revestimientos de geomembrana ya se hacían más comunes.

La lixiviación en pilas de cobre a gran escala empezó en Chile en 1980 con el proyecto Lo Aquirre. A principios de 1990 Chile tenía alrededor de 10 operaciones grandes de lixiviación en pilas; hoy existen docenas de ellas y estas utilizan geomembranas. SQM empezó a lixiviar en pilas de mineral de nitrato en el norte de Chile en 1985, escogiendo revestimientos de policloruro de vinilo (PVC) por las altas propiedades de elongación multi-axial, dada la presencia de hasta 30% de sales solubles en los terrenos que servían como base. Estas sales permiten que incluso un pequeño defecto se convierta gradualmente en una falla mayor, si el revestimiento no puede contener el asentamiento diferencial resultante.

El hoy tristemente célebre proyecto de oro de Summitville, en Colorado, EEUU, últimamente clasificado como un sitio potencialmente contaminado, fue originalmente diseñado en 1984 para utilizar PVC en el revestimiento de las pozas de lixiviación de relleno en valle, pero en su construcción se cambió a polietileno de alta densidad, (HDPE), en 1985. Esta fue una de las primeras aplicaciones de HDPE a gran escala, en la minería aurífera.

El polietileno de muy baja densidad (VLDPE) fue utilizado por primera vez en aplicaciones pequeñas, a mediados de los ochentas, y para la contención de relaves revestidos de mayor envergadura, como la

presa de relaves de oro de Ridgeway (South Carolina, EEUU, 1986). En la primera gran presa que incluía una barrera principal de geomembranas para la contención de la filtración, se utilizó VLDPE, (TS Ranch Dam, Nevada), en 1989. Otra aplicación de estas en minería de gran escala fue una poza solar para una instalación que contenía una solución de potasio, ubicada al noroeste de Argentina, en la que se cubrieron 12 hectáreas, en 1992. Desafortunadamente, la alta exposición ultravioleta dio como resultado un serio deterioramiento del revestimiento y el posterior abandono de la poza, en el transcurso de un año. El VLDPE hizo un ingreso mayor en la industria de las pozas de lixiviación en los noventa, ya que la relativamente alta elongación multi-axial del material y su buena resistencia a la fricción ofrecían beneficios para el diseño de estas. Su uso en la lixiviación en pilas continuó aumentando, hasta que se discontinuó en 1994. En el transcurso de 2 años, sin embargo, varias fórmulas de polietileno de revestimiento de baja densidad (LLDPE) comenzaron a convertirse en el revestimiento preferido para las pozas de lixiviación debido a la elongación mejorada y la resistencia a la fricción, en comparación con el HDPE.

La primera gran geomembrana compuesta, utilizada para el revestimiento de una poza de lixiviación, fue la del proyecto de oro del valle Zortman-Landusky, en Montana, la cual fue primeramente construida en 1979 y expandida varias veces en el transcurso de los siguientes 12 años, y finalmente incrementada con 150 m de mineral sobre el revestimiento. En Zortman-Landusky se utilizaba geomembrana de PVC, que era la de uso común para pozas de lixiviación, hasta 1985 aproximadamente, época en la que los revestimientos de HDPE empezaron a dominar la industria. Hoy en día la poza de lixiviación con revestimiento compuesto más grande del mundo se encuentra en el complejo aurífero Yanacocha de Newmont, en el norte central del Perú. Muchas pozas de lixiviación ubicadas en valles utilizan revestimientos compuestos, por encima del nivel de almacenamiento de agua, y revestimientos de doble geomembrana, por debajo de dicho nivel.

Los revestimientos de una sola geomembrana siguen siendo los más comunes en pozas de lixiviación de cobre y los revestimientos compuestos son más comunes en pozas de lixiviación de oro y plata. Los botaderos de cobre run-of-mine carecen generalmente de revestimiento, aunque en esta tecnología también se está comenzando a hacer uso de geomembranas. Los revestimientos de HDPE y de LLDPE de 1.5 a 2.0 mm de espesor, y los revestimientos de PVC de 0.75 a 1.0 mm de espesor son los más comunes, en tipo y espesor, actualmente utilizados en la industria minera.

2.2 *Revestimientos de doble geomembrana*

Se comenzaron a utilizar los revestimientos dobles en las pozas de procesamiento de Nevada en los ochentas, pero el uso de revestimientos dobles en aplicaciones más grandes, como las pozas de lixiviación, todavía no es muy común. La minería se ha resistido a la tecnología de la doble membrana por varias razones, que van desde costos más elevados hasta una estabilidad menor, pero principalmente debido al éxito de los revestimientos compuestos y de una sola membrana. Para 1995 existían solamente seis pozas de lixiviación de doble revestimiento, siendo algunas de las más grandes: La del proyecto El Guanaco de Amax Gold (Chile), la del proyecto La Cholla de Hecla (México) y la del proyecto Mother Load de Piedmont (Nevada, USA). Actualmente existen varias operaciones de lixiviación de oro primario en valles, en las cuales se embalsa agua dentro de las pilas pudiendo de esta manera desarrollar significativas cabezas hidráulicas sobre el revestimiento, que llegan hasta los 40 m. en uno de los casos. Las más conocidas son la de la mina Pierina (Foto 1) en Perú, la de la mina Veladero en Argentina, y la de la mina Cripple Creek en Colorado, EEUU, las cuales utilizan sistemas de doble revestimiento por debajo del nivel máximo de agua. La profundidad del mineral en estos sistemas de revestimiento varía entre los 125 y los 160 m, en estos proyectos.

La resistencia al uso de los revestimientos dobles se debe parcialmente al costo. Las pozas de lixiviación convencionales en Chile cuestan entre USD \$5 y \$11/m² (Smith, 2002). Añadir una geomembrana secundaria y un sistema de recuperación y colección de fugas (LCRS) añadiría de un 30 a un 100% al costo instalado. La constructibilidad también es un factor importante. Por ejemplo, las pozas de lixiviación más grandes de Chile pueden exceder las 150 has. El tiempo de construcción se encuentra limitado por la capacidad de los instaladores calificados, especialmente en los países en desarrollo. La estabilidad interna es otro factor importante. Las pozas de lixiviación de relleno en valles se construyen comúnmente sobre pendientes empinadas, que pueden exceder el 0.75 horizontal y el 1 vertical. El mineral a ser lixiviado es apilado intencionalmente en estado muy suelto para mejorar la distribución y la percolación de la solución; esto da como resultado un potencial de asentamiento cuando se moja y se apila progresivamente el mineral (Breitenbach, 2004). Por ende, el potencial de asentamiento del mineral y de arrastre del revestimiento son significativos en las paredes empinadas del valle. El uso de un revestimiento de doble geomembrana aumentaría este riesgo. Si bien esto se puede manejar en la etapa de diseño, de todas maneras es mucho más razonable

dirigir los proyectos hacia el uso de un único revestimiento compuesto, con pozas externas, en las que se puede reparar cualquier fuga en los revestimientos.

También existe un problema social. Cuando se aplican los principios del desarrollo sostenible, según lo requieren actualmente los prestatarios e inversores, para la mayoría de los proyectos multinacionales, se requiere una perspectiva más amplia. En una mina de cobre a gran escala en el desierto de Atacama, en donde el agua subterránea puede estar a más de 300 m de profundidad, es siempre salina, y raramente tiene usuarios locales, el costo para mejorar una poza de lixiviación promedio, añadiéndole una doble geomembrana, costaría usualmente entre \$5 y \$10 millones de USD. Ese mismo dinero podría pagar – a perpetuidad – la escuela primaria local.

2.3 Pozas de lixiviación dinámicas (on/off)

Cuando la tecnología dinámica de lixiviación en pilas fue introducida en la industria, primero para el procesamiento de oro y luego para el de cobre, muchas de las pozas de lixiviación on/off fueron construidas con concreto asfáltico (AC por sus siglas en Inglés) debido a las necesidades de soporte estructural en los momentos la carga y descarga. Se plantearon varios enfoques para crear una barrera de baja permeabilidad, que fueron desde simplemente utilizar AC con alto contenido de bitumen (como por ejemplo la mina de cobre Bluebird en Arizona, EEUU, 1967 y la mina de oro Borealis en Nevada, 1982) hasta soluciones más creativas que incluyeron el colocar capas de bitumen entre capas de AC (como por ejemplo la mina Gilt Edge en South Dakota, 1986). En general, este enfoque no fue muy exitoso y la industria se ha decantado por los recubrimientos de geomembrana con agresivas capas protectoras, siendo posiblemente la primera aplicación a gran escala la de la mina de cobre Cerro Colorado en Chile (1991). Actualmente el diseño estándar es de 1.5 a 2.0 mm de grosor en HDPE o LLDPE con un recubrimiento de grava de 1 a 2 metros.

2.4 “Impermeables” y recubrimientos entre capas

Los revestimientos temporales, usualmente llamados “impermeables”, Han sido utilizados en pozas de lixiviación en pilas, aproximadamente desde 1988, principalmente en las Filipinas, Centroamérica y Perú, en donde la fuerte lluvia diluye las soluciones de las operaciones, generando costos significativos en tratamiento de aguas. Los impermeables generalmente incluyen revestimientos de PVC (usualmente de 0.75 mm) como recubrimiento temporal hasta la siguiente temporada seca, y revestimientos HDPE más gruesos

(.75 a 1.5 mm) para aplicaciones más permanentes, no reutilizables.

Los revestimientos entre capas han sido utilizados en más de una docena de pozas de lixiviación de minas de cobre, desde 1993, principalmente en Sudamérica, para reducir el consumo de ácidos en las soluciones de lixiviación de pilas de óxidos de cobre. Los revestimientos entre capas, comúnmente de PVC (0.45 a 0.75 mm) o de LDPE (0.75 a 1.0 mm) tienen permitido cierto porcentaje de fuga, ya que el revestimiento subyacente, base de la poza de lixiviación, actúa como barrera medioambiental. El estudio de un caso indicó que la tasa común de fuga de los revestimientos entre capas es de 1 a 3% del volumen de la solución de lixiviación.

3 PROBLEMAS EMERGENTES EN LA LIXIVIACIÓN EN PILAS

3.1 Grandes Cargas

La lixiviación en pilas implica la combinación de presiones extremas sobre la base, además de condiciones de alta humedad que no se presentan en otras aplicaciones con propósitos de contención. Usualmente estas minas, por estar asociadas a terrenos mineralizados, se encuentran en zonas altamente sísmicas. Por ejemplo, la zona Sur de Chile fue el lugar que registró el sismo más largo, en 1960, en el que los 9.5 grados devastaron el país. En los últimos 35 años la profundidad promedio de las pilas ha aumentado de alrededor de 15 m a más de 100 m, y ahora se están considerando proyectos con pilas de 160 a 230 m de mineral (Breitenbach & Thiel, 2005, Thiel & Smith, 2004). El incremento en el tamaño de las pilas no es solamente un tema de economía. Algunas minas simplemente no poseen el suelo lo suficientemente aceptable como para permitir, en términos económicos, el procesamiento en pilas de menor capacidad. La tendencia general, por motivos que van desde los costos de cierre y reclamación hasta la minimización del uso de tierras agrícolas y el fomento del desarrollo sostenible, es la de reducir la cantidad de tierra impactada por la minería. Una pila más alta significa menos hectáreas de alteración.

3.2 Deformación de tubos y concentración de cargas

Los tubos de polietileno corrugados y perforados, de doble pared, se utilizan en los diseños estándar de los sistemas de drenaje de las pozas de lixiviación, en la base de la pila de mineral. A raíz de las extremas profundidades de las pilas modernas, las

deformaciones de los tubos usualmente bordean el colapso. Estas pueden llegar hasta un 30%. La predicción de la conducta de la tubería bajo cargas extremas es materia de constante investigación en laboratorio y en campo (Smith et al, 2005). Otro aspecto importante es el incremento del esfuerzo en la geomembrana ubicada cerca a la tubería en deformación. Es lógico que la presión allí aumente, ya que el efecto del arqueo en la tubería flexible disminuye la carga vertical recibida por la tubería, y el equilibrio de la fuerza requiere un incremento compensatorio en todas las otras partes. En las celdas de carga de un conjunto de pruebas a gran escala, y en los subsecuentes análisis por elementos finitos, se encontró que esta sobre-presurización alcanza un valor pico de 125% del esfuerzo vertical promedio, a una distancia igual al diámetro de la tubería, desde la tubería. (Leduc & Smith 2004). De esta manera se podría requerir un sistema de revestimientos más robusto que el que se pensó era el indicado en un principio.

3.3 La temperatura afecta

Muchas de las operaciones de lixiviación de cobre llevan a cabo procedimientos bioquímicos para recuperar el cobre de los minerales sulfurosos. Las reacciones biológicas son de temperaturas exotérmicas en la base de las pilas de sulfuros, que se estima alcanzan los 50°C. Las temperaturas altas ablandan los termoplásticos, lo que puede debilitar las tuberías de drenaje y ablandar las geomembranas. La investigación en una operación grande en Chile dio como resultado datos sobre la desviación en tubos sujetos a cargas altas, que sugieren que esta no se altera significativamente con temperaturas de hasta 60°C (Smith y otros 2005).

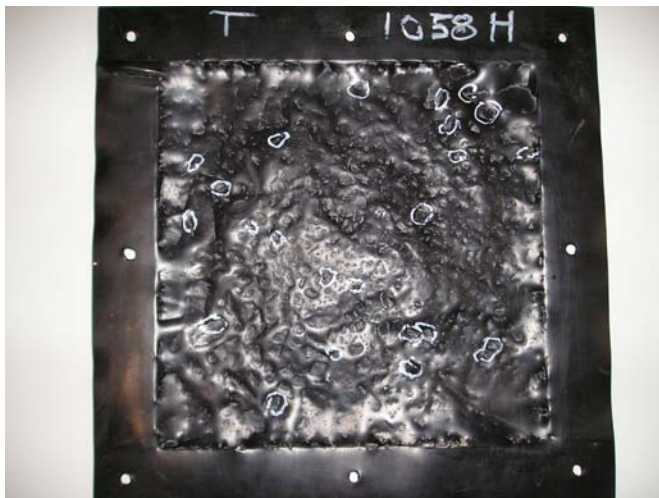


Foto 2: Prueba de perforación en HDPE de 1.5mm a 21°C.

Sin embargo, el ablandamiento de geomembranas dio como resultado un incremento significativo en las deformaciones en condiciones de laboratorio, según se muestra en las fotos 2 y 3 (ninguna de las muestras fue perforada). Las muestras de la misma geomembrana fueron sometidas a una prueba de 48 horas, bajo idénticas condiciones, a profundidades simuladas de mineral de 100 m. solo se modificó la



temperatura de prueba.

Foto 3: Prueba de perforación en HDPE de 1.5mm a 60°C

3.4 Estudios geoelectricos para la ubicación de fugas

Tomando en cuenta el valor de los metales y los reactivos de la solución de lixiviación, Theil y otros (2005) han demostrado que los estudios geoelectricos son factibles, desde el punto de vista económico, sin mencionar la reducción en los riesgos medioambientales, políticos y sociales. Sin embargo, la industria minera se ha mostrado reacia a esta tecnología, si bien esto podría estar cambiando en los últimos tiempos. Una de las primeras aplicaciones de esta tecnología en la minería fue una operación de lixiviación en pilas de relleno en valle, en Nevada, en 1995, en donde se pensó que la colocación del sistema de sobre-revestimiento había dañado la geomembrana. Esta tecnología está siendo más utilizada en Chile, y las primeras aplicaciones en Perú y Argentina se dieron en operaciones de relleno en valle, en el 2005. En Chile, en pozas solares, actualmente se llevan a cabo estudios geoelectricos para la ubicación de fugas, en una extensión de 500 a 1,000 has. al año. Datos informales sugieren que la frecuencia común de defectos encontrados en estos estudios, después de un proceso de aseguramiento de la calidad convencional de la industria de la construcción, es de 1 a 8 agujeros por hectárea.

CONCLUSIONES DESPUÉS DE 35 AÑOS

La industria minera está utilizando revestimientos de geomembranas con mayor frecuencia en los últimos años, para pozas solares, pozas de lixiviación en pilas y para la contención de relaves. El promedio anual de instalación excede las 2,000 has. de sistemas de revestimiento de base, con áreas adicionales de geomembranas utilizadas como “impermeables” y como revestimientos entre capas (en algunos casos el tamaño de estas áreas adicionales es significativo). Los revestimientos de HDPE y LLDPE dominan la industria de las pozas de lixiviación (los de LLDPE van incrementando anualmente su participación en el mercado) siendo las de 1.5mm y 2.0mm las de espesor más común. El PVC aún domina la industria de las pozas solares, siendo las de 0.75mm y 1.0mm las de espesor más común.

Los problemas emergentes en la industria de la lixiviación en pilas, incluyen: Las cargas extremas aplicadas sobre la geomembrana y sobre los tubos de drenaje (las que pronto excederán los 200 m de profundidad de mineral); la estabilidad de las pendientes y la respuesta a sismos; las zonas de sobreesfuerzo en la geomembrana cercana a los tubos de drenaje sujetos a altas cargas, los efectos de la temperatura (específicamente el riesgo de perforación de las geomembranas); y el creciente uso de los estudios geoelectrónicos.

REFERENCIAS

- Breitenbach, A.J. (1997), “Overview study of several geomembrane liner failures under high fill load conditions.” Proc. Geosynthetics '97, Long Beach, CA, USA, v. 2, pp. 1045 - 1062.
- Breitenbach, A. J. (2004), “Improvement in slope stability performance of lined heap leach pads from operation to closure.” Geotechnical Fabrics Rpt, v. 22, no. 1, pp. 18 - 25.
- Breitenbach, A. J. & Thiel, R. S. (2005), “A tale of two conditions: heap leach pad versus landfill liner strengths.” Proc. GRI-19, Las Vegas, NV, USA, Dec.
- Leduc, M. and Smith, M. E. (2004), “Solution collection pipes & overstressing of geomembrane liners.” Mining Record, Sep.
- Smith, M. E. (2002), “Copper dump leaching.” Mining magazine, July.
- Smith, M. E., Beck, A. Thiel, R. & Metzler, P. (2005), “Designing for vertical pipe deflection under high loads.” Proc. GRI meeting, Las Vegas, NV, USA, Dec.
- Thiel, R. S., Beck, A. & Smith, M. E. (2005), “The value of geoelectric leak detection services for the mining industry.” Proc. Geofrontiers, Feb.
- Thiel, R. S. & Smith, M. E. (2003), “State of the practice review of heap leach pad design issues.” Proc. GRI-18, Las Vegas, NV, USA, vol. 22, pp. 555 - 568, Dec.