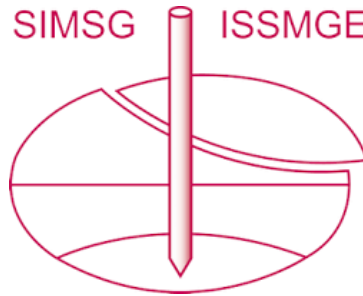


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Detección de Fugas en Geomembrana Mediante Métodos Geoeléctricos en Perú

Maturano, H.M; Romanel, C.

Pontificia Universidad Católica del Rio de Janeiro, Departamento de Ingeniería Civil, Rio de Janeiro – RJ, Brasil



ABSTRACT

Geoelectric methods have been successfully used in civil engineering works to improve environmental and production systems worldwide. The water lance method is designed to detect leaks on exposed geomembranes, while the bipolar method is intended to locate leaks in geomembranes after being covered with some type of material. Statistical data obtained from more than 95 projects indicate an average of 22 leaks / hectare in installations without a CQA (Construction Quality Assurance) plan and just an average of 4 leaks / hectare when a CQA plan is enforced. For leach pad projects in Peru, all of them with a CQA plan specified, an average of 3 leaks / hectare was reported. In the lance water method the most frequent cause of damage are the perforations produced by materials located below the geomembranes, while in the bipolar methods the holes were mainly due to the high pressures imposed by heavy machinery used for the placement of the covering material.

PRESENTACIONES TECNICAS

Los métodos geoeléctricos de detección de fugas se vienen utilizando con mucho éxito a nivel mundial en obras de ingeniería civil a fin de mejorar sus sistemas ambientales y de producción. El método lanza de agua está diseñado para detectar fugas sobre geomembranas expuestas, mientras que el método bipolar tiene como finalidad localizar fugas en la geomembrana luego de haber sido recubierta con algún tipo de material. Las estadísticas obtenidas en más de 95 proyectos muestran un promedio de 22 fugas/hec sin programa previo de CQA (Construction Quality Assurance), y un promedio de 4 fugas/hec luego de realizado un programa previo de CQA. En proyectos de plataformas de lixiviación en Perú, con programa previo de CQA, se obtuvo un promedio de 3 fugas/hec. Para el caso del método lanza de agua, los daños más frecuentes se deben a pinchazos, ejercidos por materiales ubicados debajo de la geomembrana. Para el caso del método bipolar, los daños son debidos a la presión ejercida por el equipo encargado de la colocación del material de cobertura.

1 INTRODUCTION

Actualmente los métodos más aplicados en el mundo para detectar daños en la geomembrana expuesta o recubierta son el método "lanza de agua" para la prospección de geomembranas sin recubrimiento (expuestas) y el método "bipolar" para prospecciones en geomembranas recubiertas (principalmente con suelos granulares) utilizado para localizar daños posteriores a la puesta en operación. Así también, notamos que la mayoría de los daños se encontraron en la geomembrana propiamente dicha (parte central de los paneles) y una menor cantidad en las costuras y reparaciones.

En base a los resultados de diversos proyectos, se han evaluado frecuencias estimados de fugas encontradas por hectárea de área revestida, así como los tipos de daños más frecuentes. Para el caso de plataformas de lixiviación, se han realizado cálculos de costo/beneficio sobre la aplicación de programas de detección de fugas, concluyendo que resulta económicamente rentable su ejecución comparada con las pérdidas de solución rica en mineral a través de los agujeros por largos periodos de tiempo.

Las estadísticas de las pruebas geoeléctricas realizadas en plataformas de lixiviación en Perú muestran que es común encontrar entre 0 a 4 fugas/hec

de área revestida, siendo las causas más frecuentes de daños en la geomembrana, la mala soldadura, corte con elemento filudo, punzonamiento y/o exceso de presión sobre la geomembrana.

2 MÉTODO LANZA DE AGUA

La técnica de detección de fugas mediante el método lanza de agua consiste en la aplicación de un potencial eléctrico entre el suelo ubicado debajo de la geomembrana y el agua esparcida en la superficie de la misma.

Siendo la geomembrana un material plástico eléctricamente aislante, ante la presencia de una fuga, el agua atraviesa el agujero, llegando al suelo ubicado debajo de la geomembrana, generándose una diferencia de potencial que permitir la circulación del flujo de corriente eléctrica (cerrándose el circuito). Instantáneamente el aparato detector informa al operador (vía visual y/o vía audio) la presencia de perforaciones en la geomembrana.

En la Figura 1 se observa al polo positivo salir del generador de corriente. Dicho polo va directamente a la fuente del operador y por ende al agua del charco formado sobre la geomembrana. El otro polo negativo es

introduciendo el electrodo de cobre den la zona del anclaje de la geomembrana (zona exterior al área revestida). Las medidas se realizan usando un sistema de medición de corriente eléctrica con intensidad directamente relacionada con el tamaño del orificio. El sistema dispone de un amplificador sonoro cuya frecuencia es proporcional al flujo de corriente.

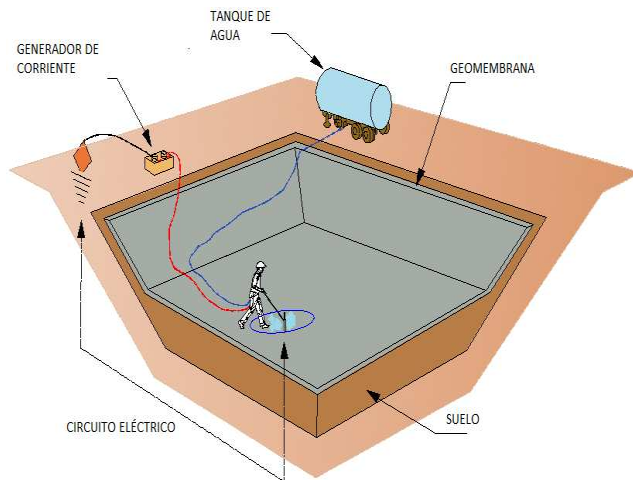


Figura 1. Esquema general del método lanza de agua.

En caso el revestimiento sea doble, se deberá evaluar primero la geomembrana más próxima al suelo y posteriormente la más superficial. Si la instalación tuviese un material conductivo instalado entre ambas geomembranas, se podrá inundar el espacio entre ambas a fin de generar continuidad de corriente.

Durante la prospección, el agua cargada con voltaje sobre la instalación no debe entrar en contacto con el suelo ubicado fuera del área en estudio, a menos que sea por alguna fuga, de darse este caso se crearán lecturas erróneas en el aparato lector.

La velocidad de prospección es un factor de suma importancia a la hora de planificar un programa de detección eléctrica de fugas. En base a la información de prospecciones realizadas en obras mineras, se ha determinado que un operador con experiencia puede realizar un promedio de 3500 m² durante un turno de trabajo diario (10 hrs), en condiciones favorables. Cabe resaltar que puede haber variaciones en la velocidad mencionada por características particulares de los lugares a prospectar o por factores climáticos.

2.1 Consideraciones Importantes

Es importante contar con una cisterna de agua, o un tanque de agua, el cual conecta una manguera hasta la boquilla del equipo de detección de fugas. La boquilla consta de varias aberturas por donde sale el flujo de agua a presión.

La sensibilidad de la prueba cumple un rol muy importante debido a la precisión que le da a la misma, pudiendo percibirse daños menores a 1 mm de diámetro. El rendimiento de la detección de fugas depende tanto de

la habilidad del operador, como de factores climáticos y mecánicos referidos al equipo de trabajo.

La conductividad de suelos en cada proyecto es diferente y varía de acuerdo a los contenidos mineralógicos y a la humedad de cada tipo de suelo, siendo las arcillas materiales muy conductivos mientras que los materiales arenosos requieren tener un mayor contenido de humedad para favorecer la conductividad eléctrica.

La prueba debe realizarse cuando las arrugas de la geomembrana sean mínimas. De no poder aplanarse las arrugas con facilidad durante el turno normal de trabajo, la prueba deberá ejecutarse en horas de la noche o madrugada, debido a que las arrugas tienden a aplanarse a bajas temperaturas.

Para obtener óptimos resultados, los elementos conductivos como tuberías de metal, bombas, y/o vigas de concreto, deben ser aisladas del área revestida, evitando falsas lecturas.

3 MÉTODO BIPOLAR

El método bipolar surge como un complemento de aseguramiento de calidad para sistemas de revestimiento compuestos con geomembrana, en algunos casos se ha trabajado previamente el método lanza de agua. Es importante mencionar que ambos métodos son independientes uno del otro.

El principio básico del método bipolar es detectar flujos de corriente del material sobre la geomembrana (material de cobertura) hacia el material debajo de la misma o viceversa. Este flujo ocurrirá solamente a través de agujeros ya que la geomembrana es un material aislante no conductivo. La aplicación de alto voltaje proveniente de una fuente de poder es introducido al sistema, colocando uno de los electrodos en el suelo o roca que recubren la geomembrana y el otro en el material debajo de esta. El operador del aparato bipolar lee y graba lecturas de diferencia de potencial, siguiendo una malla ya establecida sobre el área en la que se está realizando la prospección.

La sensibilidad del equipo se ve influenciada por muchos factores de campo, siendo el factor más importante el estado de humedad del material de cobertura sobre la geomembrana. En algunos casos es necesario regar generosamente el área de trabajo antes de realizar una prospección. La experiencia del operador para interpretar la información es también es un factor importante.

Antes de realizar una prospección por el método bipolar, el equipo debe estar calibrado. La calibración consiste en tomar lecturas sobre perforaciones reales o artificiales de diferentes tamaños y de esta manera establecer los parámetros más importantes de la prospección como son: tamaño mínimo de perforación detectada, espesor de capa de cobertura con el cual la detección será exitosa y la humedad.

Los instrumentos usados para este tipo de ensayo son: una fuente directa de corriente, conectado a un generador de baja energía; una probeta móvil, estructuralmente equipada con un sensor de medición eléctrica discontinua (simple, doble o de múltiple bipolo);

uno o varios instrumentos de visualización con recopilación de datos (voltímetro, computadora portátil, etc.); electrodos metálicos, los cuales son enterrados en el suelo.

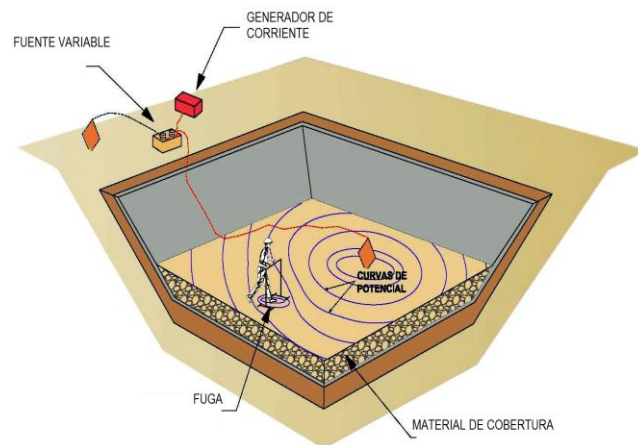


Figura 2. Esquema general del método bipolar.

La Figura 2 muestra la disposición de equipos para realizar una prospección bipolar. Como se puede apreciar, el operador lleva consigo la caja registradora, que se encuentra montada sobre un marco construido de material plástico (de preferencia). Los terminales del registrador hacen contacto con el suelo por medio de cables y cuatro electrodos localizados en la base del marco.

Ante la ocurrencia de una fuga, el flujo de corriente será detectado por el registrador en forma de lecturas pico de potencial, seguidos por una caída, que luego se tornaran constantes hasta alcanzar el ruido de fondo al alejarse de la fuga. El ruido de fondo se refiere a los límites que se establecen al hacer la calibración en campo antes del inicio de la prospección. Con este "ruido de fondo" establecido se obtiene un patrón que sirve de guía en el proceso de interpretación de las lecturas. Existen muchos factores que causan lecturas extrañas al hacer una prospección, como son: áreas con espesor de capa relativamente alto, presencia de objetos en el suelo, presencia de tuberías cercanas, humedad, etc.

La Figura 3 muestra un típico gráfico de ocurrencia de fuga, en el cual se obtienen dos picos de onda, uno positivo y el otro negativo, en el medio de estos dos picos de onda se localiza una zona de transición y un valor cero de potencial, la fuga estaría localizada entre los picos. El gráfico inferior muestra las líneas de potencial generadas por un agujero encontrado en la geomembrana, así como flujos de corriente orientados hacia el agujero. Una vez culminada la prospección se podrá elaborar un mapa de iso-valores en el cual se podrá diferenciar claramente las áreas en las cuales se tuvo lecturas muy diferenciadas.

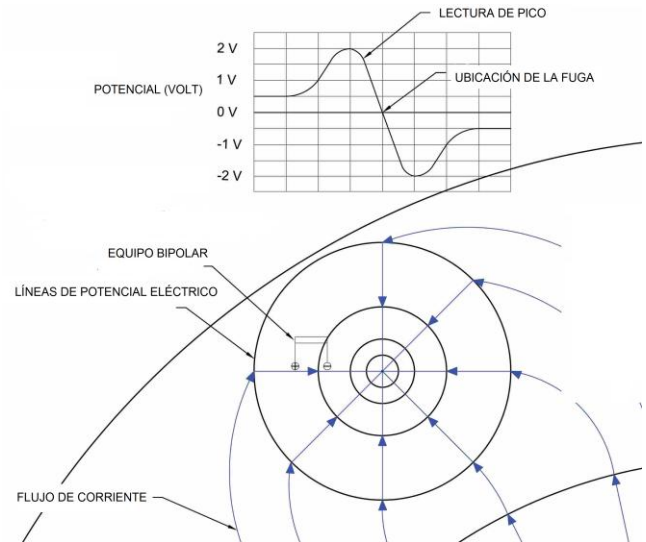


Figura 3. Ocurrencia de fuga en el método bipolar

3.1 Consideraciones Importantes

Si comparamos la velocidad de prospección el método bipolar con el método lanza de agua, resulta ser más rápida que una prospección por el método de la lanza de agua, logrando un promedio aproximado de 4000 m² por turno de trabajo (10 horas), pudiendo variar de acuerdo a las condiciones de campo.

Las curvas iso-potenciales son formadas de todos los puntos del campo potencial que tienen el mismo valor de potencial eléctrico, medido por un sustento bipolar a una orientación constante de los ejes. Ante la presencia de una fuga perturbada, las curvas equipotenciales representan una fuerte tensión entre ellas.

El suelo seco perjudica a la aplicación de la técnica bipolar. Para eso es esencial examinar el factor de humedad en el suelo recubierto, cavando una pequeña trinchera hasta la geomembrana. El ensayo se realiza una vez que se empiecen los trabajos, y se repetirá diariamente si fuese necesario.

La cantidad de agua utilizada para la irrigación varía aproximadamente entre 5 a 15 litros de agua por metro cuadrado de superficie proyectada, dependiendo del espesor del suelo.

Cuando el espesor de la capa semi-seca de la superficie es mayor de 2cms, se hace necesario mojar adicionalmente la superficie con la finalidad de asegurar la eficiente estabilización de los sensores eléctricos bipolares.

La figura 4 muestra la imagen de un daño típico ocurrido en la geomembrana, el cual fue detectado mediante pruebas geoelectricas de detección de fugas. Luego de encontrado el daño, se procede a marcarlo, para finalmente parcharlo y continuar con la prospección.



Figura 4. Daños encontrados en la geomembrana

4 PRUEBAS GEOELÉCTRICAS EN ESTRUCTURAS MINERAS

La tecnología del sondeo para la detección geoelectrica de fugas ha sido desarrollada y aplicada a lo largo de los 20 últimos años a fin de garantizar el aseguramiento de control de calidad de las obras afines (Laine & Darilek, 1993). El área de aplicación más grande de esta tecnología ha sido mayormente en la industria de desechos contaminantes y en plataformas de lixiviación.

Siendo las plataformas de lixiviación (*pads*) estructuras mineras con alta demanda para el proceso de lixiviación de mineral, se ha desarrollado un análisis económico del funcionamiento de los sondeos de detección geoelectrica de fugas en plataformas lixiviación de oro y cobre, obteniéndose que la probabilidad para que la relación beneficio/costo sea mayor que 1 es de 97% para la lixiviación de oro y de 96% para la lixiviación de cobre. Las relaciones beneficio/costo fueron determinadas a partir del cálculo de la proporción de fuga del revestimiento y del valor equivalente de la solución pérdida versus el costo del funcionamiento del sondeo.

Las relaciones de beneficio/costo fueron calculadas encontrando la relación promedio de filtración y el valor correspondiente de la solución perdida durante la vida de la instalación, comparándolo con el costo de llevar a cabo el sondeo de detección de fugas. La relación de filtración fue calculada usando la ecuación mostrada a continuación, la cual relaciona la filtración de agua en un agujero circular en un revestimiento compuesto (Giroud et. al, 1997).

$$Q/A = 0.6a \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [1]$$

Q - caudal de filtración (m³/s)

A - área de geomembrana desplegada

a - área de las anomalías (m²)

g - aceleración de la gravedad (m/s²)

h - altura de agua sobre la geomembrana (m)

Para la elaboración de la Tabla 1, se analizaron estructuras mineras como pozas y pads de proyectos

ejecutados en Estados Unidos con y sin previo programa de CQA (Construction Quality Assurance) haciendo uso del método lanza de agua y bipolar. Así también, se consideraron cargas hidráulicas de 1 m y 5 m, con tamaños promedios de agujeros de 10 mm² y 1500 mm². Finalmente se obtuvieron los caudales probables para cada caso haciendo uso de la ecuación [1].

Tabla 1 – Caudal probable en estructuras mineras (Beck et al., 2006)

Instalación	Frecuencia de furos/hec (10 mm²/1,500mm²)	Carga hidráulica (m)	Caudal probable (l/día/hec)
Pozas	22/0	5	17,630
Pozas (Con CQA)	4/0	5	3,205
Pad (LA y BIP)	22/1	1	2,971
Pad (LA y BIP, con QA)	4/0.5	1	606
Pad (solo LA)	22/0	1	2,764
Pad (solo LA, con QA)	4/0	1	502
Pad (solo BIP)	15/1	1	2,091
Pad (solo BIP, con CQA)	3/0;5	1	481

Pad - Plataformas de lixiviación, LA - lanza de agua; BIP - bipolar

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 1, notamos que en aplicaciones con elevada carga hidráulica, como es el caso de las pozas, el beneficio puede ser alto al realizarse pruebas geoelectricas debido al contacto directo del agua con la posible fuga.

Para el caso del método bipolar, notamos que el tamaño promedio de los agujeros en la geomembrana es de 1,500 mm², el cual es mayor en comparación al método lanza de agua debido a que en el método bipolar se coloca el material de recubrimiento con maquinaria pesada, generándose con cierta frecuencia daños considerables en el área revestida, afirmación esta corroborada por Nosko & Touze-Foltz (2000), quien caracteriza la dimensión de las perforaciones en función del tipo de material. De acuerdo con Forget et al. (2005) aproximadamente el 75% de daños en la geomembrana son mayores a 10mm². Así también, notamos que para áreas con carga hidráulica relativamente baja, los caudales por perforación de pequeño diámetro son prácticamente insignificantes (Beck et al., 2006).

Para sistemas revestimiento de 2 mm de espesura, con programa previo de CQA, obtenemos con realización de pruebas geoelectricas una frecuencia aproximada de fuga de 0,2 fugas/hec.

5 PRUEBAS GEOELÉCTRICAS EN PLATAFORMAS DELIXIVIACIÓN EN PERÚ

En base a las estadísticas realizadas, se observó que el 97% de daños en revestimientos ocurren durante la etapa de la construcción luego de terminadas las actividades de CQA, mientras que el 70% de las perforaciones fueron encontradas en paneles y no en soldaduras.

La evaluación fue hecha para un total de 2 907,903 m² de geomembrana expuesta y 361,000 m² de geomembrana cubierta durante un período de 14 años, concerniente a 89 proyectos de 9 países diferentes.

Generalmente, para los sistemas de revestimiento que cuentan con un riguroso programa de CQA, los ratios de fugas varían entre 0 a 7 fugas/hect, con un promedio de 4 fugas/hect (Forget et al., 2005; Rollin et al., 2004). Así también, para un sistema revestimiento sin un adecuado programa de CQA el promedio de fuga es de 22 fugas/hect.

De acuerdo a la Figura 5, notamos que para obras mineras en Perú (plataformas de lixiviación) las frecuencias varían entre 0 a 4 fugas/hect para sistemas de revestimiento con un riguroso programa de CQA previo.

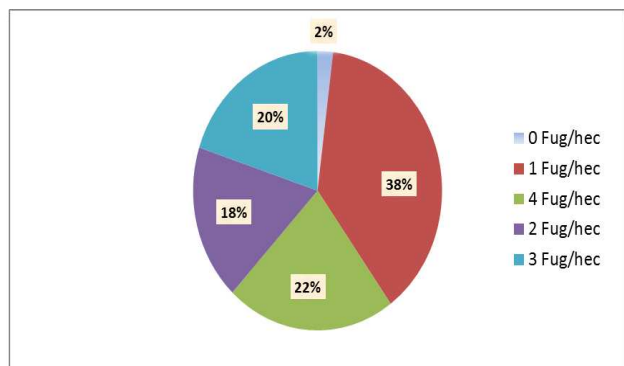


Figura 5. Frecuencia de fugas en diversos proyectos de plataformas de lixiviación con programa de CQA en Perú.

De acuerdo a investigaciones realizadas, los daños encontrados en la geomembrana se han clasificado en 4 tipos: fallas por malas soldaduras, desgarros y pinchazos. Las perforaciones pueden ser causadas durante el proceso de soldadura y pueden llegar a separarse debido a las malas soldaduras de fusión doble, perforaciones durante el proceso de fusión, presión de agua insuficiente o perforaciones como resultado soldaduras defectuosas de extrusión. Las roturas son causadas generalmente por dificultades en la instalación o por el tránsito de maquinaria pesada durante la fase de colocación del material de cobertura. Para el caso de danos por corte, generalmente son problemas causados al momento de la instalación. Finalmente, los pinchazos surgen debido al contacto con objetos puntiagudos ubicados en el suelo debajo de la geomembrana.

La Figura 6 presenta los porcentajes promedios de las diferentes causas de daños en geomembrana HDPE de 1.5 mm, instalada bajo un riguroso programa de CQA,

en diferentes proyectos de plataformas de lixiviación ejecutados en Perú.

De la figura, notamos que los daños son mayormente generados por pinchazos, los cuales se deben la presión ejercida por materiales que se encuentran debajo de la geomembrana expuesta, así también en la geomembrana recubierta con material granular, el cual daña la geomembrana por el peso propio del material de cobertura y/o por el peso de la maquinaria pesada utilizada para su colocación.

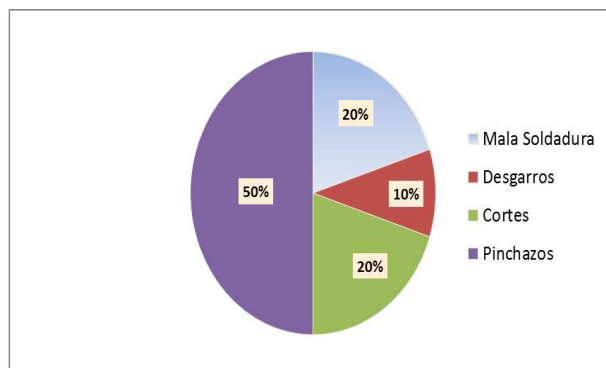


Figura 6. Densidad de tipos de daños en la geomembrana en plataformas de lixiviación en Perú, con programa de CQA.

6 CONCLUSIONES

De acuerdo a resultados obtenidos en prospecciones realizadas en plataformas de lixiviación de oro y cobre, principalmente en las cuales se ha desarrollado un programa de CQA previo, la mayoría de daños se encontraron en la geomembrana propiamente dicha (parte central de los paneles) y una menor cantidad en las costuras y reparaciones.

La presencia de perforaciones en geomembrana es el factor más importante en el ámbito de la detección de fugas, y en consecuencia, la causa de la migración de líquidos al exterior de la estructura. Las estadísticas sobre la utilización de un sistema de impermeabilización con geomembrana demuestran que es común encontrar un promedio de 0 a 4 fugas/hect en las plataformas de lixiviación ejecutados en Perú con un programa previo de CQA.

Los programas de CQA y la prospección geoelectrica de fugas tienen por objeto mejorar la calidad de la obra. Gracias a su capacidad para medir la impermeabilidad de la geomembrana instalada y de conocer la perfecta integridad hidráulica de la obra de confinamiento, el sistema de detección de fugas con métodos geoelectricos se vuelve un factor importante para el desarrollo de un Programa Integral de Aseguramiento de la Calidad.

Los sondeos de detección geoelectrica de fugas pueden ser desarrollados sobre geomembranas expuestas o recubiertas, siempre y cuando la geomembrana usada sea eléctricamente aislante.

Los sistemas doblemente revestidos (usados en algunas estructuras mineras) podrían ser evaluadas en caso se instale una capa conductiva entre las dos geomembranas, tales como un geosintético conductivo. En algunos casos la capa de detección de fugas puede ser inundada para facilitar el trabajo.

El método de lanza de agua es usado para ubicar agujeros en geomembranas expuestas y secas. Esta técnica es capaz de detectar pequeños agujeros creados durante la instalación del revestimiento, los cuales muchas veces son imperceptibles al ojo humano.

El método bipolar es usado para ubicar daños en la geomembrana luego de que haya sido recubierta con agua o material de relleno. En el caso de una cubierta de suelo, el espesor del material de cobertura puede influir en la sensibilidad del equipo. El método ha funcionado para detectar agujeros de hasta 5 mm de diámetro sobre 0.6 m de material de cobertura, así también se han realizado sondeos exitosos sobre un material de cobertura de 1.5 m.

La seguridad es un factor importante cuando se usa el método bipolar, debido a que en algunos casos esta aplicación puede involucrar altos voltajes (mayores a 400 voltios) entre los terminales de fuente de corriente. Por lo tanto, existe un real peligro si el operador realiza un contacto simultáneo con los terminales positivos y negativos cuando la fuente de corriente está encendida.

La mayoría de daños fueron causados durante la instalación de geomembrana y no durante su fase de cobertura, siempre y cuando se haya realizado previamente un riguroso programa de CQA, sin embargo, desgarros y agujeros en la geomembrana son usualmente encontrados durante la fase de cobertura con material granular.

Nosko, V. and Touze-Foltz, N. 2000. Geomembrane liner failure: Modeling of its influence on contaminant transfer. *Proc. 2nd European Conf. on Geosynthetics*, Bologna, Italy, 2: 557-560.

Rollin A.L., Jacquelin T., Forget B.T. et Saunier P. 2004. A Guide to Detect Leaks on Installed Geomembranes, *Proceedings EuroGeo3*, Munich, pp. 235-240.

REFERENCIAS

- Beck, A.; Smith, M.E.; Colmanetti, J.P. 2006. Métodos Geolétricos Empregados na Minimização de Perdas de Solução em Pilhas de Lixiviação de Minério, *COBRAMSEG – Brazilian Geotechnical Engineering Conference* (in Portuguese).
- Forget, B.; Rollin, A.L.; Jacquelin, T. 2005. Impacts and Limitations of Quality Assurance on Geomembrane Integrity, *Sardinia's 2005 Conference Proceedings*, Cagliari, Italy
- Giroud, J.P.; King, T.D.; Sanglerat, T.R.; Hadj-Hamou, T.; Khire, M.V. 1997. Rate of Liquid of Liquid Migration through Defects in a Geomembrane Placed on a Semi-permeable Medium, *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 3-4, pp. 349-372
- Laine, D.L.; Darilek, G.T. 1993. Locating Leaks in Geomembrane Liners of Landfills Covered With a Protective Soil, *Geosynthetics '93 Conference Proceedings*, Vancouver, British Columbia, Canada.