

# Vertederos de última generación

**La nueva Directiva 2008/98/CE relativa a los residuos, recomienda desarrollar nuevas tecnologías para el depósito de los residuos en vertedero, garantizando la protección del medio ambiente y la salud de las personas, reduciendo el riesgo de contaminación de los suelos y de las aguas subterráneas y evitando la emisión de los gases del vertedero. Con este propósito, la empresa Terratest Medioambiente ha introducido en nuestro país el sistema Trisoplast®, una barrera mineral modificada por un polímero, que presenta mejores propiedades que las barreras tradicionales, de capas de arcilla y mantas de bentonita, frente a la pérdida de impermeabilidad en los procesos de humectación-deseccación, y a las alteraciones producidas por la penetración de raíces y las retracciones. El polímero protege a la bentonita de los procesos de cambio iónico y evita la pérdida de humedad, manteniendo unas condiciones de plasticidad e impermeabilidad prácticamente permanentes.**

Javier Moreno Sánchez, Director División Obras y Proyectos, Terratest Medioambiente, S.L.

## Introducción

La tecnología aplicada a la construcción y sellado de los vertederos de residuos ha experimentado un considerable desarrollo en los últimos años, con objeto de adaptar las instalaciones ambientales a los nuevos requerimientos de la normativa aplicable y al incremento de la demanda social, cada vez más concienciada y exigente con las infraestructuras de gestión de residuos.

Las políticas de reciclaje han puesto de manifiesto que siempre hay una fracción no reutilizable que, en el mejor de los casos, es del 60 al 70% de los residuos generados. La solución para los residuos urbanos pasa por tratamientos mecánico-biológicos, relativamente costosos, que pueden reducir los re-

chazos al 40-50%, o bien la incineración que los reduce como máximo hasta el 10% del residuo original. Mientras que para los residuos inertes y peligrosos la solución no es muy diferente.

La directiva europea relativa al vertido de residuos (99/31/CE), que ha sido incorporada a nuestro ordenamiento jurídico (RD 1481/2001), así como el resto de normativa aplicable (Decisión 2003/33/CE), limitan las posibilidades de vertido tanto en cantidad como en la tipología de los residuos que se puedan llegar a eliminar mediante depósito en vertedero, y considera esta actividad como la peor de las opciones. No obstante, la eliminación de los residuos en vertedero sigue siendo una necesidad imperiosa para una fracción de los residuos, que paulatinamente se irá re-

duciendo, pero que en cualquier caso precisa dotarla de las mejores técnicas disponibles.

La situación de los vertederos en España ha sido francamente caótica. Ha habido una escasez de información acerca del número exacto de vertederos existentes, donde en un buen número de ellos se procedía al vertido de residuos urbanos, junto con residuos líquidos, inertes, voluminosos y/o peligrosos, sin ningún tipo de control. En otros casos, se trataba de vertederos controlados que no cumplían los requisitos mínimos y no han conseguido la autorización ambiental integrada de acuerdo a la Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (96/61/CE), y a su transposición a nuestro ordenamiento jurídico (Ley 16/2002), por lo que recientemente han sido clausurados, procediéndose en estos momentos a su sellado.

El panorama de los vertederos autorizados se ve sometido a una fuerte presión social, en su mayoría, debido al desconocimiento de la gestión que se efectúa en estas infraestructuras, que no dejan de cumplir un fin social y servir al interés general.

Por todo ello, y de acuerdo a la nueva Directiva 2008/98/CE relativa a los residuos, es necesario desarrollar e implementar nuevas tecnologías para el depósito de los residuos, garantizando la protección del medio ambiente y la salud de las personas, reduciendo el riesgo de contaminación ligado a la emisión de flujos contaminantes, tanto al medio subterráneo como a la atmósfera, para no causar perjuicios al medio ambiente.

Trisoplast® es una barrera mineral impermeable que combinada con los re-



Figura 1. Sellado de un vertedero con Trisoplast y lámina de PEAD

vestimientos artificiales o geomembranas de polietileno de alta densidad, garantizan una total estanqueidad frente a la emisión de gases y lixiviados, evitando los problemas medioambientales suscitados, permitiendo la gestión segura de los residuos en su etapa final, es decir, cuando ya se han agotado todos los procesos de gestión, reciclaje y valoración posibles. Por otro lado, la integridad y durabilidad del sistema se puede controlar sistemática y permanentemente, mediante la instalación de un sistema de detección de fugas.

### Problemática de la impermeabilización y sellado de los vertederos

Los vertederos deben estar situados y diseñados de tal forma que cumplan con el requisito de evitar la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas y superficiales, garantizando la recogida y retirada de los lixiviados, y la captación y extracción de los gases que se puedan generar para evitar las emisiones a la atmósfera. Este requisito se debe mantener, no sólo durante la fase de explotación y operación de las instalaciones, sino que se debe prolongar a lo largo de todo el periodo de mantenimiento post-clausura que en ningún caso será inferior a 30 años.

Por tanto, la barrera ha de permanecer inalterable con el paso del tiempo, y es necesario que resista importantes alteraciones físico-químicas provocadas por los contaminantes albergados en la masa de residuos que pueden verse movilizados internamente.

Para alcanzar estos objetivos, la normativa aplicable exige la combinación de una barrera geológica con revestimientos artificiales en los vertederos de residuos de Clase II y III (residuos no peligrosos y peligrosos, respectivamente). Para los vertederos de residuos inertes se prescribe, únicamente, la barrera geológica. En este sentido, la barrera geológica debe cumplir los siguientes requisitos de impermeabilidad, en función de la tipología de los residuos que ve van a depositar:

- Clase I - Residuos inertes: Permeabilidad equivalente ( $K \leq 10^{-7}$  m/s para un espesor  $\geq 1$  m).
- Clase II - Residuos no peligrosos: Permeabilidad equivalente ( $K \leq 10^{-9}$  m/s para un espesor  $\geq 1$  m).
- Clase III - Residuos peligrosos: Permeabilidad equivalente ( $K \leq 10^{-9}$  m/s para un espesor  $\geq 5$  m).

Cuando la barrera geológica natural no cumple las especificaciones técnicas de impermeabilidad, se podrá comple-



Figura 2. Sellado de un vertedero con Trisoplast

tar con una barrera geológica artificial que consistirá en una capa mineral con un espesor  $\geq 0,5$  m.

Sin embargo, estos requisitos se pueden perder con el paso del tiempo, debido a los procesos de envejecimiento a los que están sometidos los materiales.

#### Arcillas compactadas

Las arcillas compactadas deberán presentar un coeficiente de permeabilidad equivalente al exigido para la barrera geológica natural. No obstante, la instalación de capas arcillosas está sometida a los problemas de puesta en obra, extendido, compactación, desecación, etc., y a la variabilidad de la naturaleza de los préstamos naturales (relación illita - esmectita). La permeabilidad de la capa arcillosa dependerá de la tensión volumétrica de retracción y de la energía aplicada en la compactación y de la humedad, que en muchos casos no llega a cumplir con las especificaciones técnicas para las que fueron proyectadas las obras (2,11).

En un estudio realizado en el vertedero de Georgsweder, en Hamburg, por Melchior (9), se puso de manifiesto el incremento paulatino del flujo de lixiviado a través de la barrera de arcilla como consecuencia de la reducción del coeficiente de permeabilidad. Los caudales se incrementaron en más de dos órdenes de magnitud, debido a los procesos de desecación y retracción de las arcillas (7,8,9).

#### Mantas de bentonita - GCL

Las mantas de bentonita (*Geosynthetic Clay-Liner - GCL*) también se han instalado como complemento a la barrera geológica. La arcilla es una montmorillonita, generalmente sódica, que se presenta con un espesor de 6 a 10 mm, embutida entre dos geotextiles, cosidos entre sí, para facilitar su confinamiento durante el proceso de hinchamiento.

Con el envejecimiento, se han detectado problemas de intercambio iónico entre los cationes mayoritarios, que contribuyen a los procesos de retracción y fisuración de las mantas (5,6). En el estudio realizado por Melchior en el vertedero de Georgsweder, en Hamburg (9), se encontró que al cabo de 4 años, el 90% de los iones de sodio habían sido transformados y/o sustituidos por iones de calcio, disminuyendo la capacidad sellante de la bentonita. La entrada de los iones de calcio en la estructura mineral de la montmorillonita reduce su capacidad de hinchabilidad y por tanto su capacidad impermeable.

Estos procesos se aceleran con el paso del tiempo, dando lugar a un incremento del flujo de lixiviados a través del GCL. En este estudio, se llegó a comprobar que el intercambio catiónico no sólo dependía de la tipología de la bentonita, sino que se confirmó, fundamentalmente, que este proceso se debía a la circulación de aguas carbonatadas, cargadas en iones de calcio que eran también las responsables de

la migración del ión sodio. El seguimiento se realizó sobre dos GCL fabricados por empresas distintas y el resultado fue muy similar.

También es muy discutible la estabilidad de las mantas de bentonita en los taludes, a largo plazo, debido al proceso de fluidez de la bentonita aunque se encuentre armada por fibras. Este proceso se produce, especialmente, al verse sometidas a ataques, fundamentalmente, por el contacto con las sustancias químicas presentes en los lixiviados a lo largo de los años (3,12). Su reducido espesor hace que sean muy sensibles a estas agresiones que pueden desplazar la bentonita en puntos concretos, generando futuras filtraciones al crearse caminos preferentes a la circulación de los fluidos.

Tampoco hay que olvidar los problemas de solape y empalme entre las mantas, y el sellado alrededor de los conductos e instalaciones subterráneas, donde se pueden generar fallos en el sistema de impermeabilización.

**Geomembranas impermeables (PEAD)**

Normalmente, como revestimiento artificial impermeable se suelen instalar geomembranas impermeables de PoliÉtileno de Alta Densidad (PEAD) de 1-2 mm de espesor, lisas o rugosas, por una o ambas caras, dependiendo de la pendiente del vaso o de la topografía del sellado que se proyecte realizar.

Sin embargo, las geomembranas presentan una alta vulnerabilidad frente a las perforaciones y a los daños puntuales, por ello se deben proteger con ge-

otextiles antipunzonamiento, tanto en su contacto inferior como en el superior, para evitar la penetración de elementos cortantes como las gravas, las irregularidades del terreno, u otros elementos punzantes. Los geotextiles deben presentar al menos una resistencia al punzonamiento (CBR) superior a 5 kN, de lo contrario no se puede asegurar la integridad de la lámina.

Las geomembranas presentan una elevada sensibilidad a la calidad de la puesta en obra. Las instalación ha de ser cuidadosa, siempre a cargo de personal especializado, y con especial atención a los detalles constructivos, por ejemplo en el sellado de los conductos e instalaciones que atraviesen la barrera impermeable, donde con frecuencia se han detectado fugas de lixiviados.

En un estudio llevado a cabo por Bonaparte y Gross (4) sobre vertederos de residuos urbanos impermeabilizados con geomembranas, se puso de manifiesto la existencia de una media de 14 punzonamientos o perforaciones por Hectárea, con una superficie media de cada perforación de 1 cm<sup>2</sup>.

En aquellos vertederos en los que se había llevado a cabo una buena ejecución, con un elevado grado de calidad, las perforaciones se reducían a 2-3 por Ha. Mientras que en otros se llegaron a detectar hasta 100 perforaciones por Ha (10).

Estos problemas no suelen detectarse de manera inmediata, sino al cabo de los años, pues inicialmente quedan enmascarados por la contribución al sellado de la subbase y del resto de los

elementos de la solución de sellado adoptada. Lo que da lugar a la imposibilidad de reparación ya que no hay, prácticamente, capacidad de localizarlas. Bonaparte y Gross (4) apuntaban un flujo de lixiviados, en vertederos construidos siguiendo buenas prácticas, de unos 200 litros por hectárea al día, que supone unos 73 m<sup>3</sup>/Ha/año.

**La solución Trisoplast®**

La barrera mineral Trisoplast resuelve estos problemas y destaca como un sistema innovador, de última generación, para la construcción y sellado de vertederos, ya que como se elabora "in situ" se puede llevar a cabo un control del proceso de fabricación y puesta en obra, garantizando sus propiedades.

Trisoplast es una barrera mineral impermeable fabricada a base de un componente de bentonita con un polímero especialmente formulado, que se mezcla y amasa con arena y luego se extiende y compacta (90% del Proctor Normal) con procedimientos de construcción civil ordinarios (Ver figura 3).

La mezcla arena-bentonita-polímero se transforma en una estructura fuerte y densa, similar a la de un gel, formada por una red de enlaces químicos entre las partículas minerales de la arcilla, la arena y el polímero. Alcanzando prestaciones sustancialmente mejores que las obtenidas con los materiales naturales empleados tradicionalmente (1).

El espesor de la capa de Trisoplast suele oscilar entre 7 y 10 cm y su coeficiente de permeabilidad es inferior a 3·10<sup>-11</sup> m/s, lo que supone un coeficiente de permeabilidad equivalente (K) ≤ 10<sup>-9</sup> m/s para un espesor ≥ 2,33 a 3,33 m. No obstante, el espesor de la barrera se puede incrementar fácilmente en el caso que se requiera un mayor nivel de impermeabilidad extendiendo, únicamente, mayor cantidad de material.

El sistema se desarrolló en Holanda hace ya más de 10 años y en este plazo ha conseguido una cuota de mercado, en aquel país, superior al 90%, gracias a la rapidez y facilidad de su puesta en obra, incluso en taludes de elevada pendiente, y a la seguridad a largo plazo que supone su máxima resistencia y estabilidad frente a las agresiones físico-químicas.

La inspección y toma de muestras realizadas, al cabo de los años, en diversas obras han demostrado la impermeabilidad y durabilidad de la barrera mineral Trisoplast, ya que no sufre el menor deterioro con el paso del tiempo, convirtiéndose en un sistema seguro y duradero para la protección ambiental.



Figura 3. Extendido y compactación de Trisoplast

# TERRATEST

## Proyectos Llave en Mano de Vertederos



### Construcción y Mantenimiento de Vertederos

TERRATEST Medioambiente, con más de 20 años de experiencia en el realización de obras medioambientales, proporciona soluciones "llave en mano" para el diseño, impermeabilización, sellado y mantenimiento de vertederos.

#### Diseño:

- Estudios hidrogeológicos de ubicación de vertederos.
- Redacción de anteproyectos y proyectos constructivos.
- Tramitación administrativa -I PPC-.

#### Impermeabilización:

- Instalación de materiales geosintéticos bajo los programas de control más exigentes:
  - Geomembranas de PEAD, PP, PVC, EPDM.
  - Geotextiles antipunzonamiento, filtro, refuerzo, control de erosión.
  - Geodrenes para la captación y evacuación de aguas, gases y lixiviados.
- Instalador oficial de la Barrera Mineral TRISOPLAST®, que presenta mejores propiedades que las capas tradicionales de arcillas o mantas de bentonita.

#### Sellado:

- Instalación de materiales geosintéticos y TRISOPLAST.
- Ensayos de desgasificación y valoración energética de biogás.
- Instalación y alquiler de antorchas y plantas de tratamiento de lixiviados.

#### Mantenimiento post clausura:

- Captación y tratamiento de lixiviados.
- Extracción de biogás y mantenimiento de antorchas.
- Control y mantenimiento infraestructuras de sellado.
- Desarrollo del Plan de Vigilancia y Control Ambiental.



## TERRATEST

MEDIOAMBIENTE, S.L.



Miguel Yuste, 45 Bis Tel.: 914 23 75 00  
Fax: 914 23 75 01 E28037 Madrid  
www.terratest.es E-mail: tma@terratest.es

Instalador oficial

TRISOPLAST  
MINERAL LINERS

## Aprobado el decreto que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de rellenos

La propuesta del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, el Gobierno Vasco aprobó el pasado 24 de febrero el decreto que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de rellenos.

La nueva norma, que supone la adecuación de la legislación vasca a la Directiva Europea relativa al vertido de residuos, regula las clases de vertederos y rellenos; los criterios y procedimientos para la admisión de residuos; la correcta gestión y explotación de los vertederos; y los procedimientos de clausura y mantenimiento post-clausura. Siempre, en línea con los principios recogidos en la Ley General de Protección de Medio Ambiente del País Vasco en materia de residuos, entre ellos -y tras la prevención y minimización en origen y la incentivación de la reutilización, el reciclado y cualquier otra forma de valorización y cierre de ciclos-, la adecuada eliminación de los residuos que no puedan valorizarse y la implantación de los medios necesarios para su correcta gestión.

Así, el decreto distingue entre vertederos (instalación de eliminación de residuos mediante su depósito subterráneo o en superficie) para residuos peligrosos; no peligrosos; e inertes; además de establecer qué tipo de residuos son admisibles y cuáles no en cada categoría. Igualmente, determina el régimen jurídico de los vertederos, fijando la necesidad de una autorización del órgano ambiental; las obligaciones y condiciones exigidas; el deber de suscribir un seguro de responsabilidad civil y una fianza para cubrir posibles daños.

En cuanto a los rellenos (alteración morfológica de una zona mediante la utilización de tierras y rocas proceden-

tes de suelo natural), cabe subrayar que su ejecución, o la modificación o ampliación de uno ya existente, requerirá licencia del ayuntamiento concernido. En los casos de sobrantes de obras de infraestructura lineal o de obras competencia del Gobierno Vasco, la competencia será del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio -si afecta a más de un territorio histórico- o de la Diputación correspondiente.

La actual situación plantea diversos retos que abarcan desde la búsqueda del desacoplamiento entre la generación de residuos peligrosos y el crecimiento económico, pasando por aumentar las tasas de valorización, hasta mejorar las condiciones de gestión actuales para los pequeños productores.

Así, nace el "Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos de la Comunidad Autónoma del País Vasco 2008-2011" con la vocación de diseñar la actuación del órgano ambiental a lo largo de los próximos cuatro años y responde a la necesidad de disponer de una herramienta de planificación en materia de residuos peligrosos que integre los principios y los planteamientos comunitarios más actuales, incorporándose al resto de herramientas diseñadas por el órgano ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco para alcanzar la visión enunciada en el Programa Marco Ambiental 2007-2010.

Este Plan establece su propia visión, que es la de conseguir que para 2020 la Comunidad Autónoma del País Vasco haya dado pasos significativos encaminados a disociar la producción de residuos peligrosos del crecimiento económico mediante la prevención en origen, asegurando asimismo una gestión segura y próxima para los residuos peligrosos generados.

Las catas realizadas sobre sellados con más de 10 años de antigüedad han permitido verificar que la impermeabilidad y la flexibilidad de la capa de Trisoplast se mantienen intactas.

### Ventajas de Trisoplast

Como ya se ha comentado, la principal ventaja del sistema Trisoplast es que resuelve los problemas planteados por las soluciones de impermeabilización tradicionales. La arena proporciona a la barrera mineral Trisoplast la resistencia mecánica y el gel bentonítico polimérico aporta la flexibilidad y la impermeabilidad necesarias, siendo ésta normalmente entre 100 y 1.000 veces inferior a la obtenida con las barreras minerales convencionales. Y con el tiempo, es probable que esta diferencia se incremente debido a la alta durabilidad de Trisoplast.

Trisoplast no es una barrera sensible a los daños puntuales y es un material autoreparante si la agresión finalmente se produce. Se ha confirmado su estabilidad frente al ataque de sustancias químicas y es totalmente impermeable a la fuga de los gases del vertedero. La estabilidad e impermeabilidad en taludes está garantizada, por su elevado ángulo de rozamiento interno (similar a las arenas). Normalmente se trabaja en taludes de 2h:1v, pero se puede llegar a 3h:1v con maquinaria adecuada. Los asientos diferenciales no le afectan por su elevada plasticidad y elasticidad.

Las propiedades hidráulicas de Trisoplast se mantienen bajo un elevado rango de compactación y, sobre todo, estas propiedades no cambian con el paso del tiempo. El enlace químico entre las partículas de bentonita y el polímero hace que no esté sujeto a envejecimiento. Y el proceso de intercambio iónico simplemente no existe y no hay riesgo de desecación.

La fabricación "in situ" de la mezcla en una planta móvil, a pie de obra, permite mantener un elevado control de calidad tanto de la propia fabricación como de la puesta en obra (Ver figura 4). Se extiende con una retroexcavadora o con una pavimentadora, y luego se compacta con equipos ligeros hasta la densidad Proctor especificada, generalmente 90% del Proctor Normal. Para el sellado de vertederos suele prescribirse un espesor compactado de 7 cm, mientras que para la impermeabilización de base se suele llegar a los 10 cm. El ritmo medio de puesta en obra puede estimarse entre 1.000 y 3.000 m<sup>2</sup>/día, dependiendo del tipo de obra, del equipo utilizado y de la experiencia del personal. El producto no se ve afectado



Figura 4. Planta de fabricación y puesta en obra

tado por la helada, pero debe protegerse de la lluvia.

Trisoplast permite instalar una geomembrana directamente sobre él, sin riesgos de daños, evitando el geotextil antipunzonamiento. Además, la instalación inmediata del PEAD evita los riesgos de desecación y facilita el confinamiento de la capa mineral. Se recomienda llevar a cabo la instalación de las geomembranas de PEAD con un estricto control de calidad y puesta en obra, llevando a cabo el ensayo de todas las termo-soldaduras, incluso las soldaduras por extrusión.

En el caso que se precisara un mayor nivel de protección, Trisoplast también permite la instalación de un sistema de detección de fugas o geologger® bajo la lámina de PEAD. Para ellos simplemente, se debe llevar a cabo una "canaladura" en la que se introducirá el cable donde se alojan los electrodos. En el caso que se produjera una fuga de lixiviados, el geologger® detectaría la zona del fallo, lo que permitiría subsanar el problema, mientras que la capa de Trisoplast impediría que la fuga alcanzara el sustrato del vertedero y las aguas subterráneas.

### Comparativa con las barreras tradicionales

En la Tabla 1 se recoge una comparativa entre Trisoplast y las barreras tradicionales.

### Conclusiones

La solución de la barrera impermeable Trisoplast se puede considerar como una de las mejores técnicas disponibles para la impermeabilización y sellado de vertederos, ya que presentan mejores propiedades que las barreras tradicionales de capas de arcilla y mantas de bentonita.

Trisoplast es una barrera mineral modificada que ofrece una resistencia a la

pérdida de impermeabilidad en los procesos de humectación-desecación, y a las alteraciones frente a la penetración de raíces y retracciones. El polímero protege a la bentonita de los procesos de cambio iónico y evita la pérdida de humedad, manteniendo unas condiciones de plasticidad, prácticamente, permanentes (7).

Como resultado de una intensiva y continuada investigación a través de institutos independientes supervisados por organismos federales y locales, en numerosos países europeos, se ha determinado que las ventajas de Trisoplast son las siguientes:

- Permeabilidad extremadamente baja: 100 a 1.000 veces inferior a las arcillas convencionales.
- Mayores garantías frente a defectos de fabricación y puesta en obra.
- Larga vida útil debido a su gran durabilidad y robustez.
- Admite deformaciones sin daños, por su gran plasticidad y elasticidad.
- Alta estabilidad física y química frente al ataque de sustancias químicas.
- Elevada capacidad de retención de humedad: resistente a la sequedad.
- Su comportamiento como gel impide la lixiviación.
- Excelente capacidad autosellante. Sellado de estructuras y autopenetraciones.
- Estabilidad e impermeabilidad de taludes a largo plazo.
- Incremento del volumen de relleno en los vertederos, dado su reducido espesor.
- Baja permeabilidad frente al gas.

La combinación de Trisoplast con geomembranas de PEAD para la construcción y sellado de vertederos, permite garantizar su estanqueidad frente a la fuga de lixiviados y a la emisión de gases contaminantes. Este nuevo sistema constructivo hace que se puedan denominar vertedero de última generación, por su elevado nivel de calidad y prestaciones frente a la prevención de la contaminación.

**Tabla 1. Comparativa entre barreras impermeables**

Propiedad	Trisoplast®	Arcilla compactada	Mantas de bentonita (GCL)
Permeabilidad	Del orden de 10 <sup>-11</sup> m/s.	Del orden de 10 <sup>-9</sup> m/s.	Del orden de 10 <sup>-11</sup> m/s.
Flujo a su través/ Control de lixiviados	Según Darcy, una capa de 7 cm de Trisoplast® equivale a 300 cm de arcilla, o a un conjunto de 5-6 mantas de bentonita.		
Sellado frente a gases	Siempre efectivo, pues mantiene su humedad.	Sólo efectivo <u>cuando está húmeda</u> . Si se desarrollan fisuras el fallo puede ser irreversible.	Sólo efectivo <u>cuando está húmeda</u> .
Durabilidad	Comprobada a largo plazo mediante estudios.	Problemas: <u>desecación y fisuración</u> a medio plazo.	Problemas: permanencia de la bentonita en los taludes. Intercambio iónico.
Desecación/Fisuración	No es un problema.	Aparece a veces incluso durante la puesta en obra en tiempo cálido.	No es un problema, generalmente.
Intercambio iónico	No es un problema, gracias a la protección de la bentonita por el polímero.	No es un problema.	Problema importante a <u>corto plazo</u> en presencia de aguas o sustancias agresivas.
Agresiones puntuales	Muy resistente.	Muy resistente.	Problemas. El escaso espesor puede conducir a eliminaciones puntuales.
Asientos diferenciales	Muy tolerante. Material plástico.	<u>Poco tolerante</u> . Fisuras irreversibles.	Muy tolerante.
Autorreparación	Muy buena.	Inexistente, carece de hinchabilidad.	Buena. Empeora con el intercambio iónico.
Solapes/ Paso de instalaciones	Capa continua. Sin problemas.	Capa continua. Sin problemas.	Complicados y muy sensibles a la calidad de ejecución.
Instalación en taludes	Fácil. Hasta 2H:1V	Muy difícil.	Fácil. Riesgo de permanencia de la bentonita (solifusión).
Puesta en obra: facilidad	Muy fácil. Equipo sencillo. Monocapa. Poco sensible a humedad/compactación.	Fácil. Equipo sencillo. Necesidad de varias tongadas. Sensible a humedad/compactación.	Muy fácil, a menos que haya formas complicadas o muchas instalaciones. Equipo sencillo.
Puesta en obra: rapidez	Muy rápido, más de 2000 m <sup>2</sup> /día.	Mucho más lento.	Muy rápido.
Preparación previa	Sub-base compactada. No son precisos geosintéticos.	Sub-base compactada. No son precisos geosintéticos.	Precaución con partículas gruesas o punzonantes.

**Referencias**

(1) Alonso, J. (2008). Una solución a los problemas de durabilidad de las barreras minerales: Barreras in situ de bentonita – polímero. Proceedings Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública. ANI. Palma de Mallorca, España.

(2) Brian A. Albrecht and Craig H. Benson (2001), Effect of desiccation on compacted natural clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(1), 67-75.

(3) Didier, G. and Omega, L. (1997). Influence of initial hydration conditions on GCL leachate permeability. Testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners. ASTM STP 1308. Larry W. Well, Ed. American Society for Testing and Material.

(4) Gross, B.A., Bonaparte, R.B., Giroud, J.P. (1990). Evaluation of flow landfill leakage detection layers. Proceedings of the 4th international conference on geotextiles.

(5) James, A.N., Fullerton, D., and Drake, R. (1997) Fiel performance of GCL under ion exchange conditions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(10), 897-901.

(6) Meer, S. R. and Benson C. H. (2002), Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(5), 550-563.

(7) Melchior, S. (2003) Desiccation of cohesive soil barriers in landfill covers. Experimental results, hydrological processes and important boundary conditions.

(8) Melchior, S. (2002). Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers. Clay Geosynthetic Barriers, H. Zanzinger, R. Koerner, and E. Gartzung, Eds., Swets and Zeitlinger, Leese, 321-330.

(9) Melchior, S. (1997). In situ studies on the performance of landfill caps. Proc. Int. Containment Technology Conf. Florida State University, Tallahasee. Fla., 365-373.

(10) Needham, A. et al. (2004). The likely medium to long-term generation of defects in geomembrane liners. R&D Technical Report P1-500/1/TR.

(11) Philip, L.K., Shimell, J., Hewit, P.J., Ellard, H.T., (2002). A fiel-based test cell examining clay desiccation in landfill liners. Quaterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Geological Society of London, 35, 345-354.

(12) Ruhl, J., and Daniel, D. (1997). Geosynthetic clay liners permeated whit chemical solutions and leachates. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(4), 369-381.