

GUÍA PRÁCTICA PARA LA INSPECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS UTILIZADAS EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE BALSAS

ÍNDICE

1.	OBJETIVOS Y ÁMBITO DE APLICACIÓN	3
2.	BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS (GBR-P).....	5
3.	NORMATIVA DE REFERENCIA	9
3.1.	Normas.....	9
3.2.	Reglamentación técnica.....	9
4.	CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS (GBR-P).....	12
4.1.	Poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P).....	12
4.1.1.	Composición	12
4.1.2.	Características de las geomembranas de PVC-P	14
4.1.3.	Procesos de degradación	15
4.2.	Polietileno (PE).....	17
4.2.1.	Composición de las geomembranas de PEAD.....	18
4.2.2.	Características de las geomembranas de PEAD	19
4.2.3.	Procesos de degradación	20
4.3.	Etileno-propileno-dieno monómero (EPDM).....	22
4.3.1.	Composición.....	22
4.3.2.	Características de las geomembranas de EPDM.....	24
4.3.3.	Procesos de degradación	24
5.	OTROS GEOSINTÉTICOS	25
5.1.	Geotextiles y productos relacionados con geotextiles.....	25
5.1.1.	Geotextiles.....	25
5.1.2.	Productos relacionados con geotextiles.....	27
5.1.3.	Principales características a determinar	28
5.1.4.	Utilización en impermeabilización de balsas.....	29
5.2.	Geocompuestos de drenaje. Georedes.....	30

6.	REQUERIMIENTOS DE LAS BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS ORIGINALES	31
6.1.	Dimensionales.....	31
6.2.	Mecánicos	31
6.3.	Térmicos	31
6.4.	Durabilidad	32
6.5.	Otras características.....	32
7.	CRITERIOS PARA LA INSPECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS GBR-P EN SERVICIO	33
7.1.	Estado inicial de la geomembrana	33
7.2.	Seguimiento. Toma de muestras.....	33
7.3.	Características a determinar en cada GBR-P	37
7.3.1.	Poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P)	37
7.3.2.	Polietileno de alta densidad (PEAD).....	39
7.3.3.	Etileno-propileno-monómero diénico (EPDM)	40
7.4.	Vida útil. Reimpermeabilización.....	42
7.4.1.	Reimpermeabilización total o parcial.....	44
7.4.2.	Elección de la nueva geomembrana.....	46
7.4.3.	Remoción de la geomembrana existente.....	46
8.	PATOLOGÍAS POSIBLES EN EL SEGUIMIENTO DE LAS GBR-P.....	448
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	68

1. OBJETIVOS Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

Las balsas han ido evolucionando desde sus inicios, como albercas en huertos familiares, hasta convertirse en infraestructuras hidráulicas con unas dimensiones tales, que muchas de ellas están consideradas como grandes presas. Las primeras balsas estaban construidas con muros de mampostería o bien aprovechando terrenos arcillosos, lo que limitaba su ubicación a zonas donde no eran totalmente necesarias.

La extensión del regadío en nuestro país hizo necesario disponer de grandes volúmenes de agua regulados y localizados, para garantizar el suministro diario de agua. Como consecuencia de esto, las balsas pasaron a ser infraestructuras disponibles en cualquier terreno, con diques externos construidos con el material excavado, para conseguir mayor volumen de agua almacenada, e impermeabilizadas con barreras geosintéticas poliméricas en el interior del dique.

Debido al número de balsas, el volumen de agua almacenado y la importancia que han alcanzado estas estructuras, las Administraciones Públicas competentes en la materia consideraron prioritario garantizar un nivel de seguridad adecuado en las mismas. En 2008 se publicó el Real Decreto que modificó el Reglamento del Dominio Público Hidráulico en el que aparece la primera referencia legislativa de las balsas, e incluye un nuevo título, concretamente el VII, que trata de la seguridad de presas, embalses y balsas y tiene como principal objetivo, unificar en una misma norma los criterios de seguridad a aplicar a todas ellas, con independencia de dónde se encuentren y quien sea el titular, así como delimitar las funciones de las Administraciones competentes en materia de seguridad.

Asimismo, se determina que los titulares de presas y balsas de altura superior a 5 metros o de capacidad de embalse mayor de 100.000 m³, tanto de titularidad privada o pública, existentes, en construcción o que se vayan a construir estarán obligados a llevar a cabo su clasificación en función del riesgo potencial en caso de rotura o funcionamiento incorrecto en tres categorías: A, B o C y, para aquellas clasificadas en las categorías A o B, la de elaborar el Plan de Emergencia.

Esta legislación hace obligatoria la redacción de las Normas Técnicas de Seguridad en las que se establecen las exigencias mínimas de seguridad de las balsas, graduándolas según su clasificación, y determinando las actuaciones que el titular debe realizar en cada una de las fases de la vida de la balsa.

Con todo esto, queda establecido un sistema de control de seguridad caracterizado por la intervención y control de las Administraciones Públicas en todas las fases de la vida de las balsas: proyecto, construcción, puesta en carga, explotación y puesta fuera de servicio. Este sistema se apoya en dos pilares fundamentales: las obligaciones exigidas al titular de la balsa y la intervención que debe realizar la Administración Pública competente para verificar que el titular ha cumplido las exigencias determinadas en las Normas Técnicas de Seguridad.

Las tareas de los titulares, en la fase de explotación de la balsa, conlleva el estudio de la evolución de las barreras geosintéticas impermeabilizantes a través de unas determinaciones físicas, químicas y de durabilidad que aseguren la impermeabilización de la balsa a lo largo del tiempo, así como disponer de la información necesaria para llevar a cabo su reimpermeabilización. Esto generará una serie de informes técnicos que tendrá que evaluar la Administración competente y que forman parte de sus actuaciones como organismo de control.

En el marco de esta normalización, y con el propósito de favorecer la labor de las Administraciones Públicas, la Dirección General del Agua ha considerado necesaria la elaboración de la “*Guía para la inspección y seguimiento de las barreras geosintéticas poliméricas utilizadas en la impermeabilización de balsas*” con la finalidad de establecer unos criterios claros y sencillos, para que el personal de las distintas Administraciones Públicas, disponga de herramientas suficientes para evaluar el estado de la impermeabilización de las balsas de almacenamiento de agua.

Teniendo esto en cuenta, la estructura de la *Guía* se ha planteado de tal forma que incluye una parte descriptiva, en la que se especifica la composición y procesos de degradación sufridos por las geomembranas, y otra parte en la que se definen los valores mínimos de las características más significativas de cada geomembrana y que indican el final de su vida útil.

En la elaboración de la *Guía* han participado organismos públicos, empresas fabricantes e instaladoras de geomembranas y laboratorios de control de calidad. Cada uno de estos organismos ha realizado aportaciones para la redacción de la *Guía* en función de su experiencia en el sector de la impermeabilización.

2. BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS (GBR-P)

Las barreras geosintéticas (GBR) o geomembranas son materiales geosintéticos de baja permeabilidad empleados para reducir o evitar el paso de fluidos a través de ellas. Dentro de las mismas, podemos distinguir tres grupos dependiendo del material que ejerce la función de barrera:

- **Barreras geosintéticas bituminosas (GBR-B):** La función de barrera se realiza mediante productos bituminosos.
- **Barreras geosintéticas de arcilla (GBR-C):** La función de barrera es realizada por una arcilla.
- **Barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P):** La función de barrera es desarrollada por polímeros.

La utilización de estas últimas, tanto en contacto con el suelo como con otros materiales, es muy amplia en el campo de la obra civil, desde la impermeabilización de balsas, a la impermeabilización de presas, túneles, canales o vertederos.

En el campo de impermeabilización de balsas, las ventajas que presentan estas geomembranas poliméricas son:

- Elongación o capacidad de la geomembrana para experimentar alargamientos y acomodarse a los movimientos del soporte.
- Resistencia a bajas temperaturas.
- Peso ligero.
- En general son fáciles de transportar, manejar y aplicar.
- Pueden aplicarse bajo condiciones ambientales adversas.
- Reparaciones sencillas.

Los materiales poliméricos empleados en la impermeabilización se pueden clasificar, atendiendo a sus propiedades físicas, en:

- **Termoplásticos:** Son aquellos polímeros que por acción del calor reblandecen (“plastifican”) de forma reversible, solidificándose de nuevo al enfriar. Funden sin descomposición. Están constituidos por macromoléculas lineales o muy poco ramificadas.
- **Elastómeros:** Son aquellas materias poliméricas que por acción del calor endurecen de forma irreversible. También se denominan duroplastos, materiales termoestables o termoendurecibles. Están formados por macromoléculas muy ramificadas o reticuladas.
- **Cauchos termoplásticos:** son elastómeros que tienen un comportamiento termoplástico en lugar de termoestable.

Teniendo en cuenta esta clasificación, en la tabla 1 se presentan los principales materiales poliméricos empleados en la elaboración de geomembranas para impermeabilización.

Tabla 1. Materiales poliméricos utilizados en la confección de geomembranas para impermeabilización

Nomenclatura	Material básico	Clase
ECB	Copolímeros de acrilatos/etileno y betún	Termoplásticos
EVA/C	Copolímeros de acetato de vinilo y etileno	
EEA	Copolímeros de acetato de etilo y etileno	
PE	Polietileno	
PEC	Polietileno clorado	
PP	Polipropileno	
PIB	Poliisobutileno	
PVC-P	Poli(cloruro de vinilo) plastificado	
TPO	Termoplástico poliolefínico	
E/P	Copolímeros de etileno/propileno	Cauchos Termoplásticos
CSM	Polietileno clorosulfonado	
CR	Caucho de cloropreno	Elastómeros
EPDM	Caucho terpolímero de etileno/propileno/monómero diénico	
IIR	Caucho butilo	
NBR	Caucho de acrilonitrilo/butadieno	
BR	Caucho de butadieno	
POE	Poliolefina elastomérica	

De los materiales poliméricos, los más utilizados en la impermeabilización de balsas en España son el policloruro de vinilo plastificado (PVC-P), el polietileno de alta densidad (PEAD) y etileno-propileno- monómero diénico (EPDM).

Además de estos materiales, las geomembranas contienen aditivos, que son productos que acompañan a las resinas en la formulación de la lámina para modificar sus propiedades. De forma general, los de mayor interés son:

- **Cargas:** son aditivos sólidos que se incorporan al polímero para modificar sus propiedades físicas, especialmente sus propiedades mecánicas.
- **Plastificantes:** sustancias normalmente líquidas que añadidas a un material plástico aumentan su flexibilidad.
- **Aditivos antienviejimiento:** son necesarios ya que los materiales plásticos se modifican sus características con el paso del tiempo. Entre estos aditivos se encuentran:

- **Antioxidantes:** evitan en lo posible la degradación de la cadena polimérica por el fenómeno de oxidación, bien sea durante el proceso de fabricación o una vez instalada en la balsa.
 - **Antiozonizantes:** previenen la degradación de ciertos cauchos, fundamentalmente cuando están sometidos a tensión.
 - **Estabilizadores contra la deshidrocloración:** en materiales clorados retardan la pérdida de ácido clorhídrico.
 - **Absorbentes de la luz UV:** evitan la reacción en cadena de degradación de la macromolécula provocada por las radiaciones solares. Como absorbente de luz ultravioleta destaca el negro de carbono.
- **Agentes ignífugos o pirorretardadores:** aquellas sustancias que en pequeñas cantidades disminuyen o retrasan el carácter inflamable de la geomembrana.
- **Otros aditivos:** por ejemplo, fungicidas (para prevenir el ataque por hongos a las láminas), pigmentos (sustancias sólidas que confieren color y opacidad) o agentes de conductividad (permiten transformar la superficie de la lámina en conductora).

Las geomembranas utilizadas en impermeabilización se suelen presentar de las siguientes formas:

- a) **Homogéneas**, constituidas, exclusivamente, por el material polimérico y los aditivos correspondientes.
- b) **Multicapa**, formadas por una serie de capas del mismo material o de distintos materiales. De este modo se puede conseguir mejorar las propiedades mecánicas o la protección frente a la radiación ultravioleta y evitar la retracción.
- c) **Con refuerzo interno o armadas**, cuando el material polimérico lleva inserciones de fibras, velos o tejidos. Los materiales de refuerzo comúnmente utilizados para estos fines son la fibra de vidrio y los hilos sintéticos, fundamentalmente, hilos de poliéster. Dependiendo del tipo de refuerzo se puede mejorar una propiedad determinada para un uso particular. En algunos casos, el objetivo fundamental de esta inserción es la mejora de las propiedades mecánicas, entre otras, la estabilidad dimensional de la lámina.
- d) **Revestidas externamente** con velos, tejidos, u otros refuerzos externos, para evitar la aparición de tensiones del proceso de fabricación y/o para reforzar la resistencia mecánica.

Además, las geomembranas pueden estar combinadas con otras geomembranas u otros geosintéticos formando geocompuestos.

Las características de las geomembranas para su utilización en impermeabilización de embalses y presas vienen recogidas en la norma UNE-EN 13361.

En la figura 1 se presentan ejemplos de balsas impermeabilizadas con geomembranas de PVC-P, PE y EPDM.



Figura 1. Ejemplos de balsas impermeabilizadas con geomembranas de PVC (a), PE (b) y EPDM (c)

3. NORMATIVA DE REFERENCIA

3.1. Normas

Los ensayos a realizar inicialmente en las geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD), poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) y caucho de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) están contemplados en la norma **UNE EN 13361**. “*Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas*”.

Adicionalmente, también serán de aplicación las normas de ámbito nacional:

- **UNE 104427**. “*Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de polietileno (PE)*”
- **UNE 104423**. “*Materiales sintéticos. Puesta en obra. Sistemas de impermeabilización de embalses para riego o reserva de agua con geomembranas impermeabilizantes formadas por láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) no resistentes al betún*”.

Además de estas normas, el *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*, editado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en 2010, es otro documento de referencia para evaluar las características que se determinarán en el seguimiento de las geomembranas impermeabilizantes.

3.2. Reglamentación técnica

El vigente Texto Refundido de la Ley de Aguas dispone en su artículo 123 bis, dedicado a la seguridad de presas y embalses, que, con la finalidad de proteger a las personas, al medio ambiente y a las propiedades, el Gobierno regulará mediante Real Decreto las condiciones esenciales de seguridad que deben cumplir las presas y embalses, estableciendo las obligaciones y responsabilidades de sus titulares, los procedimientos de control de la seguridad, y las funciones que corresponden a la Administración pública.

Dando cumplimiento a este mandato, se aprueba el *Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril*, en el cual se incorpora un nuevo Título VII dedicado a “la seguridad de las presas, embalses y balsas”.

Esta modificación del Reglamento de Dominio Público Hidráulico supone la primera referencia legislativa a las balsas, las cuales se definen, en su artículo 357, como la “obra hidráulica consistente en una estructura artificial destinada al almacenamiento de agua situada fuera del cauce y delimitada, total o parcialmente, por un dique de retención”.

Así mismo, en su artículo 367 se establece que los titulares de presas y balsas de altura superior a 5 metros o de capacidad de embalse mayor de 100.000 m³ (figura 2), de titularidad privada o pública, existentes, en construcción o que se vayan a construir, estarán obligados a llevar a cabo su clasificación en función del riesgo potencial en caso de rotura o funcionamiento incorrecto en tres categorías: A, B o C y, para aquellas clasificadas en las categorías A o B, la de elaborar el Plan de Emergencia.

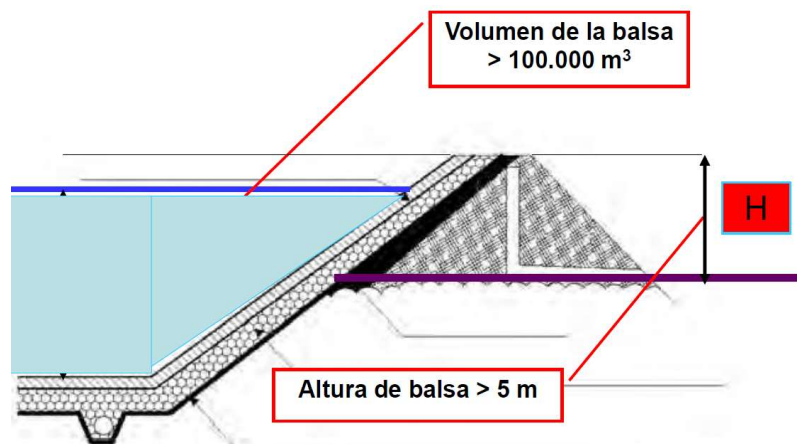


Figura 2. Requisitos para la clasificación de balsas (RD 9/2008)

La definición de cada una de estas categorías es la siguiente:

- **Categoría A:** balsas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, así como producir daños materiales o medioambientales muy importantes.
- **Categoría B:** balsas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños medioambientales o materiales importantes o afectar a un número reducido de viviendas.
- **Categoría C:** balsas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdida de vidas humanas.

Para los citados Planes de Emergencia se redactó, en el año 2012, la **Guía Técnica para la Elaboración de Planes de Emergencia de Balsas** que facilita y simplifica la tarea a los titulares de estas, que están obligados a la elaboración de dichos planes y que únicamente es aplicable en los casos de balsas que estén situadas fuera de cauce, sin cuenca de aportación y cuyo llenado se realice de forma controlada, bien sea por bombeo o por derivación.

De acuerdo con esta Guía técnica, el *Plan de Emergencia* es un documento técnico donde se recogerá la organización de medios, tanto materiales como personales, necesarios para:

- El *control de los factores de riesgo* que puedan comprometer la seguridad de la balsa.
- La *prevención y protección* en caso de rotura o avería grave de la misma.

Estos planes serán elaborados por el titular de la balsa y tramitados y aprobados por la Administración Hidráulica competente en materia de seguridad de presas y embalses de acuerdo con el esquema reflejado en la figura 3.

Todos los Planes de Emergencia de las balsas se incorporarán, una vez aprobados, en:

- El Plan Estatal.
- Los Planes de las Comunidades Autónomas.
- Los Planes de Actuación Municipal cuyo ámbito pueda verse afectado.

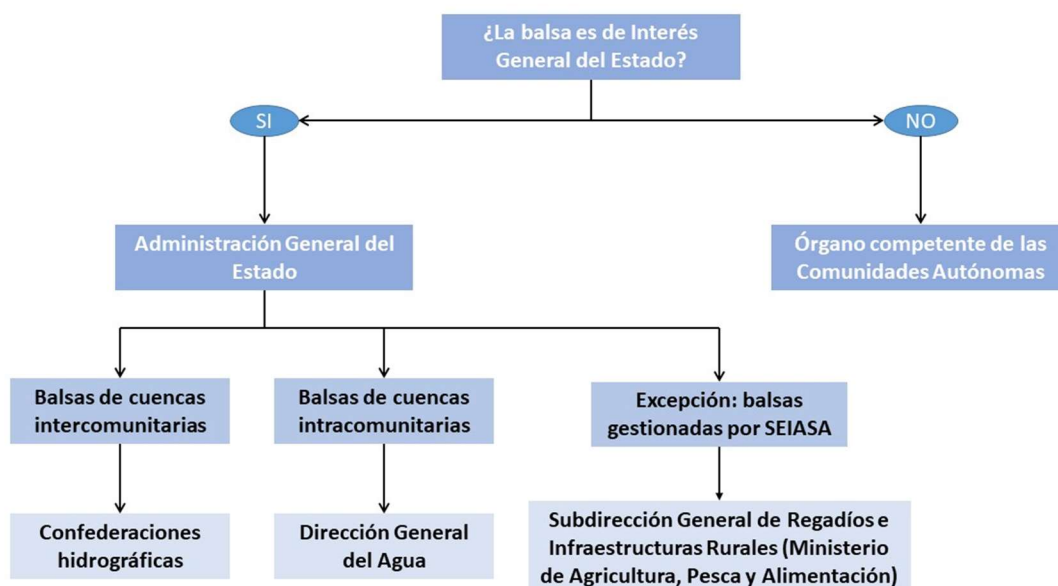


Figura 3. Organismos competentes en la tramitación de los Planes de Emergencia

Una vez clasificada y registrada la balsa, así como implantado su correspondiente Plan de Emergencia, el titular será el responsable de la seguridad de la misma y de sus instalaciones y, por tanto, le corresponden las siguientes obligaciones:

- Cumplir las Normas Técnicas de Seguridad.
- Contar con solvencia económica para hacer frente a las exigencias de seguridad de su balsa.
- Asumir las condiciones y adoptar las medidas necesarias por motivos de seguridad.
- Facilitar a la Administración cualquier información en materia de seguridad, así como comunicarle cualquier actuación que pueda alterar las condiciones de seguridad de la balsa.
- Permitir el acceso a los representantes de la Administración cuando fuera necesario.

Por su parte, a la Administración le corresponde el control de la seguridad de la balsa, entendiendo por tal el conjunto de actuaciones que debe llevar a cabo para verificar el cumplimiento por parte del titular de la balsa de los diversos requisitos establecidos en materia de seguridad.

Por último, hay que destacar que actualmente se encuentran en fase de redacción y consultas las **Normas Técnicas de seguridad de Balsas** a las que se ha hecho referencia dentro de las obligaciones del titular, que establecerán las exigencias mínimas de seguridad de las balsas, así como los estudios y actuaciones que deberán llevarse a cabo en cada una de las etapas de su vida.

4. CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS (GBR-P)

4.1. Poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P)

Las propiedades físicas del PVC hacen que sea apropiado para adaptarse a las exigencias tecnológicas en áreas tan importantes como la construcción y el transporte. Su principal limitación es su inestabilidad frente al calor y la radiación ultravioleta, no obstante, a pesar de estas desventajas, ha conseguido mantenerse entre los principales materiales poliméricos utilizados en la impermeabilización de balsas.

El PVC es un polímero que presenta una elevada dureza y rigidez que, unidas a su inestabilidad térmica y ultravioleta, hacen que sea necesario el empleo de numerosos aditivos que lo hagan apto para su comercialización como geomembranas impermeabilizantes.

4.1.1. Composición

La formulación típica de una geomembrana de PVC-P empleada en impermeabilización suele estar compuesta por un 50-70% de poli(cloruro de vinilo), un 25-35% de plastificantes y un 2-5% del resto de aditivos entre los que se encuentran el negro de carbono, las cargas, los estabilizantes y otros aditivos para facilitar su procesado. En la tabla 2 se presentan los componentes empleados en su fabricación.

Tabla 2. Formulación de una geomembrana de PVC-P

COMPUESTO	CANTIDAD, %
PVC	50-70
Plastificantes	25-35
Otros Aditivos: Absorbentes de luz UV <i>Negro de carbono</i> <i>Dióxido de titanio</i> Cargas <i>Carbonato cálcico</i> Estabilizadores	2-5

Los **plastificantes** constituyen uno de los aditivos más importantes que participan en la formulación de las geomembranas impermeabilizantes. Estos aditivos convierten al PVC originalmente rígido en un material polimérico flexible y fácil de procesar.

Los más utilizados comercialmente en el PVC son compuestos derivados de ftalatos, ésteres alquílicos o arílicos del ácido ftálico en los que las cadenas radicálicas presentan una gran variedad en cuanto a longitud y ramificación. Los más utilizados a nivel comercial son los que figuran en la tabla 3.

Tabla 3. Plastificantes utilizados en las geomembranas de PVC-P

ABREVIATURA	NOMBRE QUIMICO
DIDP	Ftalato de diisodecilo
DNOP	Ftalato de dioctilo
DUP	Ftalato de diundecilo
DEHP	Ftalato de bis(2-etilhexilo)
DIDNP	Ftalato de isodecilnonilo
DIDUP	Ftalato de isodecilundecilo
BzBP	Ftalato de bencilbutilo
DDP	Ftalato de di-n-decilo

Existen otros tipos de plastificantes como los poliméricos, plastificantes sólidos y los constituidos por compuestos orgánicos basados en materias primas renovables.

El PVC se puede considerar un polímero único en cuanto a su compatibilidad con los plastificantes mencionados. Además, tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de este tipo de aditivos, lo que da lugar a una modificación de sus propiedades físicas que lo hacen apto para su aplicación en impermeabilización.

Los **absorbentes de luz ultravioleta** actúan absorbiendo o apantallando la radiación ultravioleta. Los más importantes son el negro de carbono o el dióxido de titanio (TiO₂), que actúan también como pigmentos. El dióxido de titanio, de color blanco, da estabilidad al color de la geomembrana además de aumentar la resistencia a la intemperie. La pigmentación negra de una de las capas de las geomembranas se consigue con negro de carbono.

Las **cargas** se utilizan para reducir costes o para mejorar las características mecánicas. Se utilizan productos como el carbonato cálcico, la calcita microcristalina, el caolín, el talco, sulfato de bario, sílice y silicatos.

Los **estabilizantes** constituyen un aditivo valioso para el PVC debido a su gran inestabilidad frente a la degradación térmica y ultravioleta. En su degradación, el PVC genera cloruro de hidrógeno que provoca una reacción de degradación en cadena, dando lugar a radicales libres que pueden formar peróxidos, hidroperóxidos, así como modificaciones en las cadenas moleculares que ocasionan la aparición de zonas decoloradas o con coloración amarillenta, lo que indica la degradación de la geomembrana de PVC-P.

Los *estabilizantes térmicos* empleados en el PVC reaccionan con el cloruro de hidrógeno generado en su degradación, bloqueando las posiciones reactivas de la macromolécula de PVC. Tradicionalmente las más utilizadas son las sales de bario, cadmio y zinc, combinando dos metales diferentes, Ba/Cd y Ca/Zn, dando lugar a un efecto sinérgico en la estabilización.

La búsqueda de compuestos más “amigables” con el medioambiente y rentables, como estabilizantes de PVC, ha dado lugar al desarrollo de nuevos estabilizantes orgánicos basados en compuestos poliméricos y oligoméricos así como compuestos inorgánicos de magnesio-aluminio, conocidos como arcillas intercambiadoras de iones. Asimismo, han sido objeto de estudio las arcillas basadas en montmorillonita y los estabilizantes térmicos basados en productos naturales y biopolímeros como proteínas de soja y aceites de semilla de girasol y soja.

La efectividad de estos estabilizantes térmicos alternativos se basa en los mismos mecanismos de estabilización ya conocidos para el PVC: inhibir la formación de ácido clorhídrico.

Los *estabilizantes ultravioleta* actúan fundamentalmente a través de dos mecanismos: absorbiendo la radiación ultravioleta y neutralizando partes de la molécula de PVC responsables del inicio del proceso de degradación. Entre ellos se encuentran los pigmentos citados anteriormente y las aminas impedidas estéricamente, conocidas con las siglas HALS (“Hindered Amines Light Stabilizers”) que están consideradas como las mejores estabilizantes ultravioleta.

Otros aditivos. El PVC es un material autoextinguible debido a la presencia de cloro en su estructura molecular. A pesar de esto, para algunas aplicaciones se hace necesaria la adición de *retardantes de llama* como los complejos inorgánicos de magnesio/zinc o molibdeno/calcio/zinc. En las formulaciones de PVC para su procesado mediante calandrado se utilizan complejos de zinc/fosfato/molibdeno.

Los *lubricantes* constituyen un grupo de aditivos importantes en el PVC ya que sin ellos es prácticamente imposible su procesado. En el PVC plastificado su objetivo principal es impedir la adherencia de los compuestos de moldeo de las diversas partes del equipo.

4.1.2. Características de las geomembranas de PVC-P

Las geomembranas de PVC-P presentan en general buena resistencia frente a reactivos químicos excepto a la ciclohexanona y tetrahidrofurano, que pueden utilizarse para realizar la unión entre láminas. Son difícilmente inflamables y autoextinguibles debido a la presencia de cloro en las moléculas del polímero. Respecto a las características mecánicas, tienen una elevada resistencia a la tracción y a la deformación, así como al punzonamiento, por lo que se adaptan fácilmente al terreno. Al ser un material termoplástico, la capacidad de soldadura es muy buena, permitiendo la realización de la soldadura con disolventes o por calor.

Existen diferentes tipos de geomembrana de PVC-P dependiendo del refuerzo interno o externo que lleven incorporado en su constitución. Como se ha mencionado en el punto 3, pueden encontrarse geomembranas homogéneas, multicapa sin refuerzo, con refuerzo interno y revestidas externamente. Suelen fabricarse como multicapa y es corriente observar dos colores en la lámina, siendo la capa externa la que lleva mayor cantidad de aditivos para la protección ultravioleta y la interna con mayor proporción de biocidas y fungicidas para protección del ataque por microorganismos del terreno.

La figura 4 muestra una selección de los diferentes tipos de geomembranas de PVC que se comercializan actualmente.

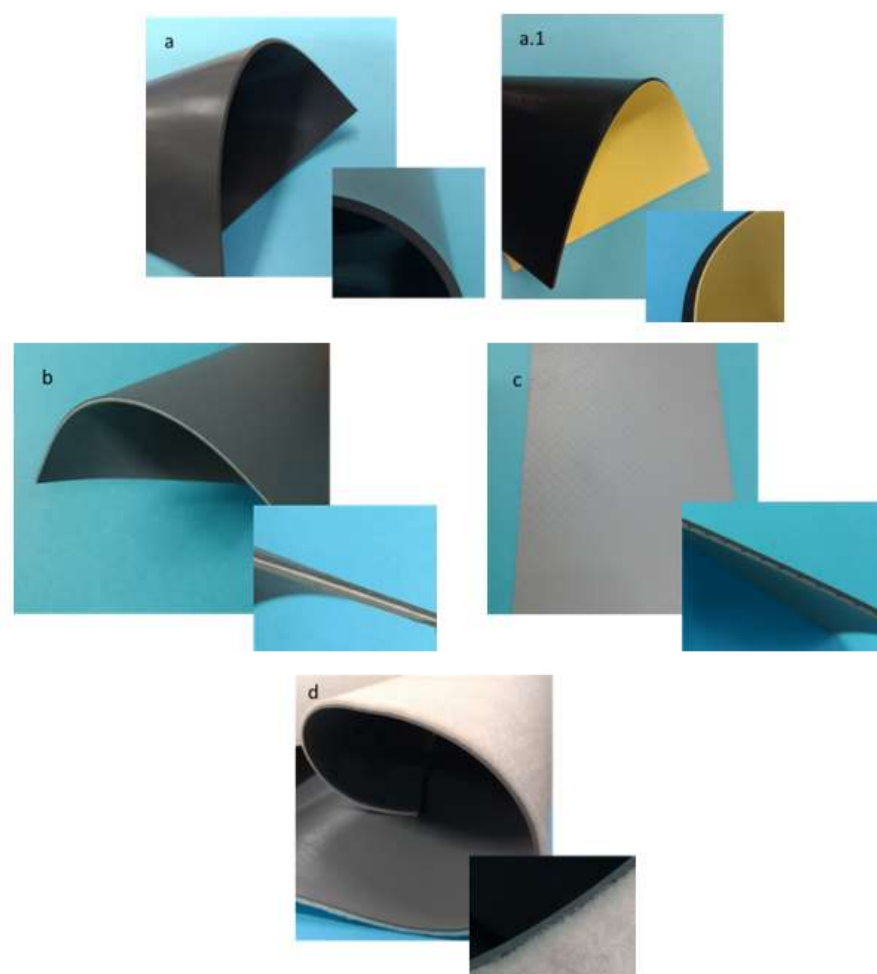


Figura 4. Tipos de geomembranas de PVC: homogénea (a), homogénea bicapa (a.1), reforzada con fibra de vidrio (b), reforzada con geotextil tejido (c) y revestida con un geotextil (d)

4.1.3. Procesos de degradación

Las geomembranas de PVC-P experimentan principalmente tres procesos de degradación: pérdida de plastificantes, envejecimiento térmico y envejecimiento por radiación ultravioleta o fotodegradación. Estos tres procesos se pueden dar simultáneamente o por separado.

- *Pérdida de plastificantes*

La pérdida de plastificantes es un proceso que sucede a través de tres mecanismos de migración de plastificante: al aire o volatilización, al agua o disolución y a otro sólido.

La migración del plastificante al aire o volatilización se debe a la difusión desde el interior de la geomembrana a la superficie produciéndose la evaporación del plastificante al aire. Estudios realizados han mostrado que el incremento del peso molecular del plastificante junto con la disminución de las ramificaciones en la molécula del plastificante, reducen la pérdida por volatilización de la geomembrana de PVC-P.

La extracción de plastificante por un líquido, ya sea agua o algún producto químico, se produce cuando el líquido penetra en la geomembrana y se difunde en el seno del material polimérico dando lugar a la disolución y pérdida gradual de plastificante.

La migración del plastificante desde una geomembrana PVC-P a otro material sólido también puede producirse. Al igual que en los procesos anteriores, el incremento del peso molecular y una estructura molecular lineal del plastificante, da lugar a una reducción de la migración a un sólido.

Este último proceso de migración se ha observado cuando se han puesto en contacto dos geomembranas de PVC-P, en los baberos de protección sobre la geomembrana impermeabilizante de la balsa. Se ha detectado una transferencia de plastificante desde el babero a la geomembrana debido a la tendencia a igualar las concentraciones de plastificantes.

También se ha observado migración de plastificante entre una geomembrana de PVC-P y otra de PEAD que se encontraban en contacto, después de una reimpermeabilización. En este caso, como consecuencia de la reacción entre el plastificante y los aditivos presentes en la geomembrana de PEAD, se produjo una aceleración de la degradación de la geomembrana, que dio lugar a agrietamiento por esfuerzos (stress-cracking).

El empleo de plastificantes con un peso molecular superior a 400, evita una rápida migración de los plastificantes, de forma que se consigue una mayor durabilidad de la geomembrana y por otra parte, preservar el medio ambiente de estas sustancias.

- *Envejecimiento térmico y fotodegradación*

Tanto la degradación térmica del PVC como la producida por la radiación ultravioleta presente en la luz solar, dan lugar a la eliminación de ácido clorhídrico, originando zonas decoloradas en la geomembrana, así como la rotura de las cadenas macromoleculares, provocando la degradación del material polimérico.

En la figura 5 se presentan los tipos de degradación que experimentan las geomembranas de PVC-P.



Figura 5. Tipos de degradación en una geomembrana de PVC-P: grietas por degradación del PVC (a), rotura por granizo (b), decoloración por pérdida de ácido clorhídrico (c)

4.2. Polietileno (PE)

El polietileno es un polímero que presenta una gran inercia química frente a un elevado número de reactivos, lo que hace que esté presente en muchos sectores como la automoción, alimentación, envases, embalajes, construcción y agrícola.

La estructura química del polietileno está formada por unidades de etileno dando lugar a una cadena molecular lineal difícil de romper. No obstante, debido a los procesos secundarios de polimerización o de copolimerización con otras moléculas, se generan puntos débiles en el seno del polímero que dan lugar a reacciones de oxidación provocando la degradación del material. Esto explica que casi siempre se incorpore una pequeña cantidad de antioxidantes durante el proceso de fabricación de la geomembrana, con objeto de evitar su degradación, ya sea durante el periodo de fabricación, o bien una vez instalada la geomembrana en obra.

Los diferentes tipos de polietileno que se encuentran comercialmente se clasifican en función de la densidad de la resina y los más empleados en el sector de la construcción y en el agrícola se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Tipos de polietileno y sus aplicaciones

Material	Polietileno de alta densidad (PEAD).	Polietileno de media densidad (PEMD)	Polietileno lineal de baja densidad (PELBD)
Densidad de la resina, g/cm ³	> 0,940	0,926 – 0,940	0,919 – 0,925
Aplicaciones	Geomembranas impermeabilizantes	Tuberías	Filmes
Productos			

4.2.1. Composición de las geomembranas de PEAD

Las geomembranas impermeabilizantes están constituidas por polietileno de alta densidad y una serie de aditivos para evitar su degradación térmica y la provocada por la radiación ultravioleta. La formulación típica de una geomembrana figura en la tabla 5.

Tabla 5. Formulación de una geomembrana de PEAD

COMPUESTO	CANTIDAD, %
PEAD	95-98
Negro de carbono	2-3
Otros aditivos <i>Antioxidantes</i>	0.5-1

El **negro de carbono** es uno de los aditivos más importantes en las geomembranas de polietileno. Se emplea como estabilizante ultravioleta ya que actúa absorbiendo la radiación UV y disipando la energía absorbida en forma de calor. El comportamiento óptimo del negro de

carbono depende del tamaño de partícula empleado y la dispersión dentro de la matriz polimérica.

La cantidad de negro de carbono que se incorpora a la resina polimérica está comprendida entre el 2 y el 3%. Cantidades inferiores serían insuficientes para evitar la degradación por las radiaciones solares. Si es importante el contenido en negro de carbono, más aún es su adecuada dispersión en la geomembrana ya que de lo contrario, las características pueden variar notablemente de unos puntos a otros y dar lugar tanto a fallos mecánicos como a la degradación del polietileno por el ataque de la radiación solar.

Los **antioxidantes** tienen una especial importancia en la formulación de la geomembrana de polietileno ya que previenen la oxidación durante su proceso de fabricación y además aseguran la estabilidad del polímero durante su tiempo de vida útil. Existen muchos tipos de antioxidantes, clasificados como primarios y secundarios, que actúan en función de su actividad frente a la oxidación del polietileno.

- Los *antioxidantes primarios* actúan atrapando o desactivando radicales libres, de forma que dan lugar a compuestos neutros con la finalidad de estabilizar el polímero. Un ejemplo lo constituyen los compuestos químicos derivados de fenoles y aminas impedidas estéricamente.
- Los *antioxidantes secundarios* están diseñados para descomponer los compuestos generados en la oxidación del polietileno en otros menos reactivos y de esta forma prevenir la formación de radicales libres en el proceso de degradación de la geomembrana de polietileno. Un ejemplo lo constituyen los compuestos derivados de fosfitos orgánicos, compuestos de azufre y aminas impedidas estéricamente.

Esto implica que en la formulación de la geomembrana de polietileno se deberían incluir antioxidantes de ambos tipos, con el fin de asegurar su durabilidad.

Por otra parte, los antioxidantes son estables en diferentes rangos de temperatura, por lo que habrá que incluir antioxidantes que protejan a la geomembrana durante su procesado, en el que soporta elevadas temperaturas, y en su puesta en servicio a temperatura ambiente.

4.2.2. Características de las geomembranas de PEAD

Las propiedades físicas y mecánicas de las geomembranas de PEAD se encuentran relacionadas con la densidad de la resina polimérica.

La figura 6 muestra como las propiedades de dureza, resistencia a la tracción y resistencia química aumentan a medida que aumenta la densidad del polietileno mientras que disminuyen otras como la flexibilidad, la permeabilidad y la resistencia a la fisuración por esfuerzos medioambientales (“stress-cracking”).

Las geomembranas de PEAD presentan un buen comportamiento con respecto a la resistencia mecánica a la percusión o impacto dinámico y peor comportamiento frente a la resistencia al impacto estático o punzonamiento. En relación con la prueba de comportamiento a bajas temperaturas, presenta un buen comportamiento incluso a -75°C.

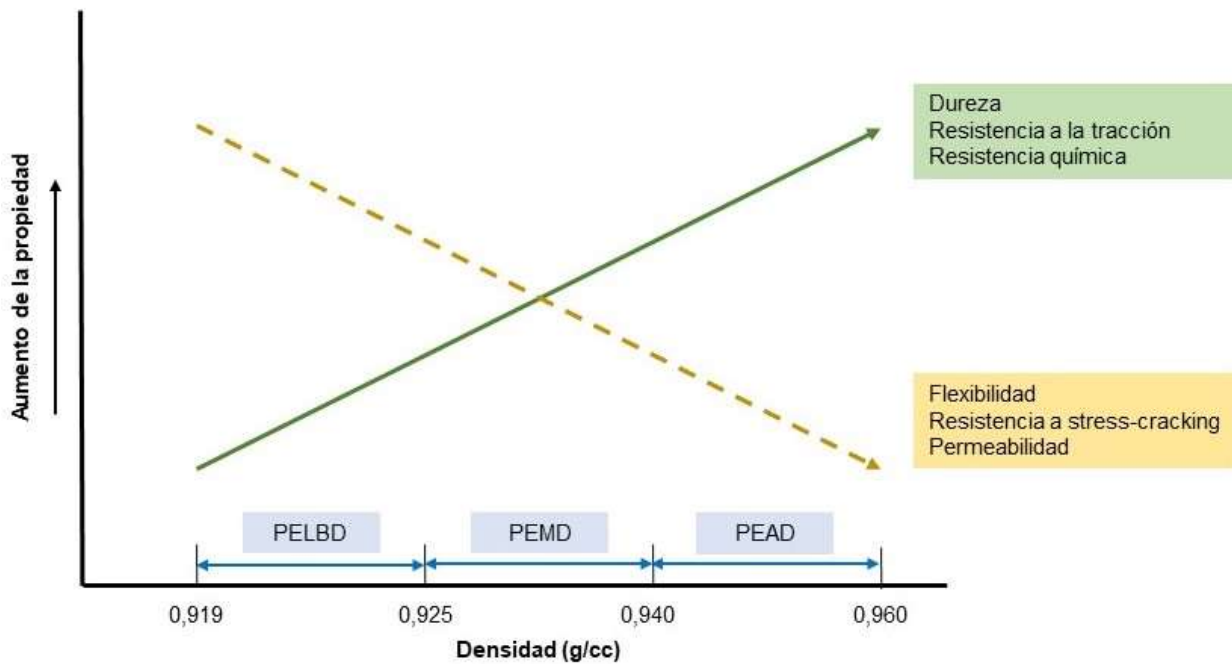


Figura 6. Relación entre la densidad del polietileno y sus propiedades

4.2.3. Procesos de degradación

Los procesos más representativos de la degradación de las geomembranas de PEAD son el agrietamiento por esfuerzos medioambientales y la degradación oxidativa.

- *Agrietamiento por esfuerzos medioambientales*

El proceso de agrietamiento por esfuerzos medioambientales también llamado “stress-cracking” tiene lugar debido a la presencia de zonas cristalinas y zonas amorfas en la estructura molecular del polietileno. Este agrietamiento se produce cuando la geomembrana está bajo la acción de agentes externos y a la vez sometida a un esfuerzo constante. Adicionalmente a la influencia del esfuerzo soportado, el agrietamiento se acelera por las altas temperaturas.

En la figura 7 se muestra el proceso de agrietamiento de forma esquemática. Las cadenas macromoleculares están organizadas en fases cristalinas y amorfas de forma que algunas cadenas de la fase amorfa actúan de enlace entre estructuras cristalinas adyacentes. Cuando la geomembrana está sometida a un esfuerzo constante, se produce el deslizamiento de las cadenas macromoleculares en la fase amorfa, dando lugar a la fractura y separación de la fase cristalina, este proceso se acelera en contacto con determinados agentes, como por ejemplo tensioactivos.

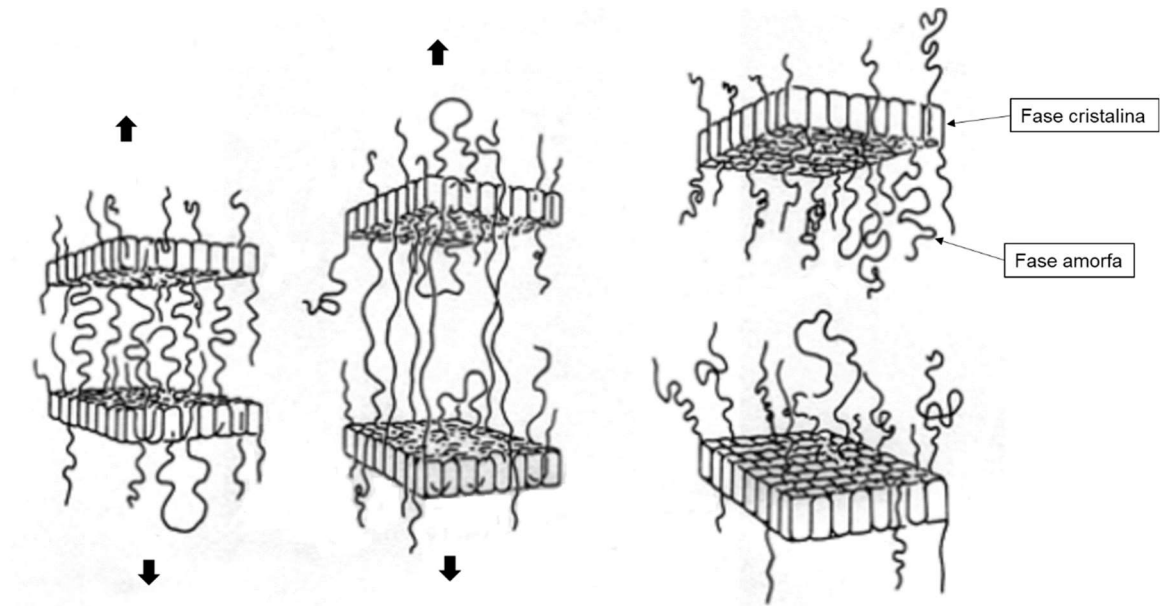


Figura 7. Mecanismo de rotura de las cadenas macromoleculares en el PEAD

El agrietamiento por esfuerzos se produce cuando la geomembrana está soportando una tensión constante y existe un punto débil que es el origen del agrietamiento como por ejemplo en las zonas cercanas a las soldaduras, en zonas con piedras o protuberancias debajo de la geomembrana, en los parches, así como en zonas con rasguños en la superficie de esta.

En la figura 8 se observan las grietas iniciales detectadas en la zona de coronación de una balsa, en la zona de soldadura y la temperatura registrada en la superficie de la geomembrana.



Figura 8. Agrietamiento por esfuerzos medioambientales (stress-cracking) detectado en diferentes puntos de una geomembrana de PEAD

- *Degradación oxidativa*

La degradación oxidativa se produce por la acción del oxígeno, iniciando un proceso rápido debido a la reacción por radicales libres. El mecanismo se desarrolla mediante procesos cíclicos, comenzando por la acción del oxígeno en las cadenas macromoleculares y la propagación de los radicales libres formados dentro de la masa del polímero.

Este proceso puede describirse en tres etapas:

- Primera etapa: comienza la pérdida de los antioxidantes presentes en la geomembrana.
- Segunda etapa: periodo de inducción en el que los antioxidantes están agotados y comienza la degradación lenta del polímero.
- Tercera etapa: se produce la degradación del polímero. Como consecuencia de este proceso, la geomembrana experimenta una disminución de las propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y alargamiento en la rotura provocando el fin de la vida útil de la geomembrana.

4.3. Etileno-propileno-dieno monómero (EPDM)

Las geomembranas de EPDM están constituidas por un copolímero de etileno-propileno y una pequeña cantidad de un monómero con dobles enlaces en su molécula que permitirán la posterior vulcanización convencional del polímero. De esta forma se obtiene un caucho vulcanizado con pocos puntos reactivos en su macromolécula, lo que le hace especialmente resistente frente al ataque por ozono. Este hecho ha sido el motivo por el cual el EPDM fue desplazando al caucho butilo en el campo de la impermeabilización.

4.3.1. Composición

Una formulación típica de una geomembrana de EPDM es la que figura en la tabla 6 en la que se aprecia que la cantidad de material polimérico es inferior que el de las geomembranas de PVC y PEAD.

Tabla 6. Formulación de una geomembrana de EPDM.

COMPUESTO	CANTIDAD, %
Etileno+Propileno+Monómero diénico	25-40
Negro de carbono	20-40
Aceites parafínicos	10-20
Otros Aditivos:	
Antioxidantes	
Estabilizantes	
Arcillas, Azufre, Aceleradores	8

La geomembrana de EPDM requiere de una mayor cantidad de aditivos debido a su naturaleza polimérica para procesar la geomembrana y aumentar su durabilidad. Los aditivos que forman parte de la formulación del EPDM van desde los agentes de curado y activadores de la vulcanización, aceites para mejorar los procesos de fabricación y reducir la viscosidad del material hasta los estabilizantes que disminuyen el efecto de las radiaciones ultravioletas en la resina polimérica. En la tabla 7 se resumen los tipos de aditivos empleados en las geomembranas de EPDM.

De todos los aditivos, el que se encuentra en mayor proporción es el negro de carbono que desempeña dos funciones:

- Actuar como carga para mejorar algunas características mecánicas.
- Actuar como estabilizante ultravioleta atrapando los radicales libres que se producen en la degradación de la geomembrana.

Los dos requisitos que se le exige al negro de carbono es que el tamaño de partícula y su dispersión en la geomembrana sean los adecuados para conseguir una incorporación homogénea en la misma y evitar los posibles fallos mecánicos o ataque por radiación solar.

Tabla 7. Aditivos de las geomembranas de EPDM

ADITIVOS	FUNCIÓN	COMPUESTOS
Catalizadores	Controlan la reacción de polimerización	Sales de vanadio, haluros de alquil-aluminio y metallocenos.
Agentes de curado	Vulcanización: generan una red tridimensional de macromoléculas dando lugar al material elastomérico.	Azufre y peróxidos
Activadores de la vulcanización	Mejoran el tiempo de vulcanización, reducen la temperatura de dicho proceso y disminuye la cantidad de azufre necesaria.	Óxido de cinc
Aceleradores de la vulcanización	Reducen el tiempo de vulcanización	Benzotiazoles, Ditiocarbamatos
Aceites	Facilitan el procesado en la fabricación de la geomembrana reduciendo la viscosidad de la mezcla polimérica	Aceites parafínicos y aromáticos
Estabilizantes UV	Capturan radicales libres que se producen en la geomembrana	Negro de Carbono
Cargas	Mejoran la estabilidad dimensional y propiedades ignífugas	Arcillas y Negro de Carbono

4.3.2. Características de las geomembranas de EPDM

El caucho de EPDM presenta una buena resistencia al envejecimiento y al ozono debido a su estructura química. La densidad de dobles enlaces presentes en sus macromoléculas, que resultan perjudiciales para su durabilidad, disminuye debido al proceso de vulcanización, lo que da lugar a una buena resistencia al ataque de agentes externos en la geomembrana. En cuanto a compuestos químicos, es atacado por aceites de petróleo y gasolina

Una de las propiedades importantes que presenta la geomembrana es su elevada flexibilidad a las bajas temperaturas, ofreciendo unos buenos resultados a -55°C .

Su resistencia al impacto estático (punzonamiento) es elevada lo que le confiere una buena resistencia a la posible perforación de los áridos presentes en el terreno.

Respecto a las características mecánicas, la resistencia a la tracción sufre poca variación con el tiempo, sin embargo, el módulo de elasticidad aumenta mientras que el alargamiento hasta la rotura disminuye de forma notable a lo largo del tiempo. Otra de las propiedades que varía en las geomembranas de EPDM es su dureza, detectándose un aumento a lo largo del tiempo.

Las resistencias al desgarro y al impacto dinámico presentan valores iniciales bajos, pero mejoran con el tiempo debido a los procesos de entrecruzamiento.

4.3.3. Procesos de degradación

El EPDM es más estable que los cauchos butilo, cloropreno y butadieno, sin embargo, a pesar de su estabilidad, presenta una comprobada tendencia a la oxidación. Este fenómeno es el principal mecanismo de degradación en el EPDM lo que provoca alteraciones de los enlaces moleculares entre las cadenas poliméricas, pudiendo conducir a la ruptura de las cadenas.

La degradación oxidativa del EPDM ha mostrado que durante los procesos de escisión de cadena en la oxidación del polímero se produce una recombinación de radicales libres que da lugar a un entrecruzamiento adicional. Este proceso de reticulación parece ser muy rápido si se compara con las reacciones de oxidación. Adicionalmente, se observa que el aumento del entrecruzamiento conduce a una disminución de la concentración de oxígeno en el terpolímero, lo que da lugar a una disminución en la velocidad de oxidación, de forma que esta degradación oxidativa puede llegar a detenerse. Este hecho se ha comprobado en diferentes elastómeros diénicos, tales como el caucho butilo, caucho de estireno-butadieno y caucho natural.

Este proceso de reticulación a lo largo del tiempo explicaría la variación de las propiedades mecánicas y la retracción de la geomembrana, causa fundamental de la degradación de la geomembrana de EPDM.

En la figura 9 se presentan ejemplos de tipos de degradación detectados en las geomembranas de EPDM.



Figura 9. Detalles de la degradación de las geomembranas de EPDM: perforación por la presencia de sólidos punzantes (a), despegue de la soldadura (b), reparación de perforaciones en la coronación de la balsa (c) retracción de la geomembrana (d).

5. OTROS GEOSINTÉTICOS

5.1. Geotextiles y productos relacionados con geotextiles

5.1.1. Geotextiles

Los geotextiles son materiales textiles planos, permeables y poliméricos (sintéticos o naturales), cuyos elementos individuales son fibras o filamentos que se entrelazan entre sí mediante diversos procesos, obteniéndose estructuras continuas, relativamente delgadas, porosas y permeables en forma de láminas, que se emplean en contacto tanto con suelos como con otros materiales en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil.

Existe una gran diversidad de geotextiles cuyas propiedades dependen de los siguientes factores:

- La **materia prima** empleada en su fabricación. Los polímeros más empleados son:
 - **Poliolefinas** (polietileno y polipropileno). Son sensibles a la acción de los agentes oxidantes y a la acción de la luz ultravioleta, por lo que se les añade generalmente negro de carbono como aditivo para mejorar su durabilidad.
 - **Poliésteres**. Son susceptibles de sufrir hidrólisis alcalina. Este proceso puede tener lugar en contacto con el hormigón, por lo que conviene señalar la importancia de no colocar un geosintético de poliéster en contacto con hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, ya que en este último caso también se puede producir su hidrólisis debido a la presencia de lixiviados del citado hormigón con un pH muy alcalino.
 - **Poliamidas**. Son susceptibles de sufrir hidrólisis, fundamentalmente en medios ácidos.

- **Tipo de filamento.** Pueden ser de filamento continuo o de fibra cortada.
- **Sistema empleado en la fabricación.** Según el sistema pueden ser:
 - *Geotextiles no tejidos (GTX-N).* Constituidos por fibras, filamentos u otros elementos, orientados regular u aleatoriamente, unidos mecánicamente o térmicamente.
 - *Geotextiles tejidos (GTX-W).* Se obtienen al entrelazar, generalmente en ángulo recto, dos o más conjuntos de hilos, fibras, filamentos, cintas u otros elementos.
 - *Geotextiles tricotados.* Son geotextiles fabricados mediante entrelazado de hilos, fibras, filamentos u otros elementos.

En las figuras 10 y 11 se presentan ejemplos de geotextil no tejido y tejido, respectivamente.

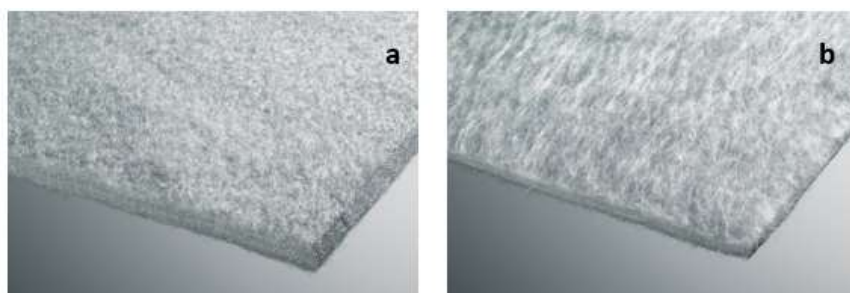


Figura 10. Geotextil no tejido de filamentos continuos: para protección (a) para separación y filtro (b)



Figura 11. Geotextil tejido de polipropileno

- **Funciones de los geotextiles**

Las aplicaciones de los geotextiles se basan en cinco funciones básicas: drenaje, filtración, separación, refuerzo y protección. En la mayoría de los casos el geotextil cumple simultáneamente varias de las funciones, no obstante, una de ellas es siempre la principal, que será la base para el diseño de la obra.

- **Función de drenaje.** Consiste en la conducción de líquidos y gases, es decir, la evacuación del agua y el aire del suelo.
- **Función de filtración.** Consiste en la retención de partículas de grano fino al fluir el agua de la capa de grano fino a la de grano grueso.
- **Función de separación.** Se utiliza para la separación de dos capas de suelo de diferentes propiedades físicas y así evitar de forma permanente la mezcla de material.

- **Función de refuerzo.** El geotextil asociado a un suelo refuerza el conjunto, aportándole resistencia a la tracción. Juega puntualmente un papel de armadura y de unión entre los granos: la presencia de una lámina continua permite repartir las tensiones locales.
- **Función de protección.** En este caso el geotextil va siempre asociado a una barrera geosintética impermeable, como elemento de protección para evitar su deterioro debido a perforaciones y al desgaste.

5.1.2. *Productos relacionados con geotextiles*

Los productos relacionados con geotextiles constituyen, junto con los geotextiles, la familia de materiales permeables de los geosintéticos. Los más utilizados son: geomalla, geored, geoestera, geocelda, geobanda y geoespaciador.

- **Geomalla.** Estructura plana polimérica que consiste en una red abierta regular de elementos que actúan por tracción integralmente conectados y cuyas aberturas son mayores que sus elementos constitutivos. Posee elevada resistencia y baja deformación y actúa como elemento estructural, para distribuir la carga que transmiten terraplenes, cimentaciones y pavimentos.
- **Geored.** Geosintético constituido por conjuntos de nervios (cordones) paralelos superpuestos, que se conectan integralmente con otros conjuntos similares, formando diferentes ángulos. Se utiliza para drenaje.
- **Geoestera.** Consiste en una estructura tridimensional, permeable, fabricada por monofilamentos poliméricos y otros elementos (sintéticos o naturales). Se emplea para control de la erosión.
- **Geocelda.** Consiste en una estructura tridimensional de gran peralte y forma romboide, permeable, polimérica, con estructura de panal de abeja, o similar, fabricada por bandas o tiras unidas de geosintéticos. Se utilizan principalmente para contener rellenos en taludes, con el objetivo de evitar su deslizamiento y erosión.
- **Geobanda.** Material polimérico fabricado en forma de banda, con un ancho no superior a 200 mm, que se emplea en la consolidación de suelos blandos como drenes verticales.
- **Geoespaciador.** Estructura polimérica tridimensional diseñada para crear un espacio de aire en suelos, y otros materiales. Se utiliza para la separación y el drenaje.

De todos estos productos, los más utilizados en las balsas impermeabilizadas con barreras geosintéticas poliméricas son las geomallas y las georedes.

En la figura 12 se presentan varios ejemplos de productos relacionados con los geotextiles.

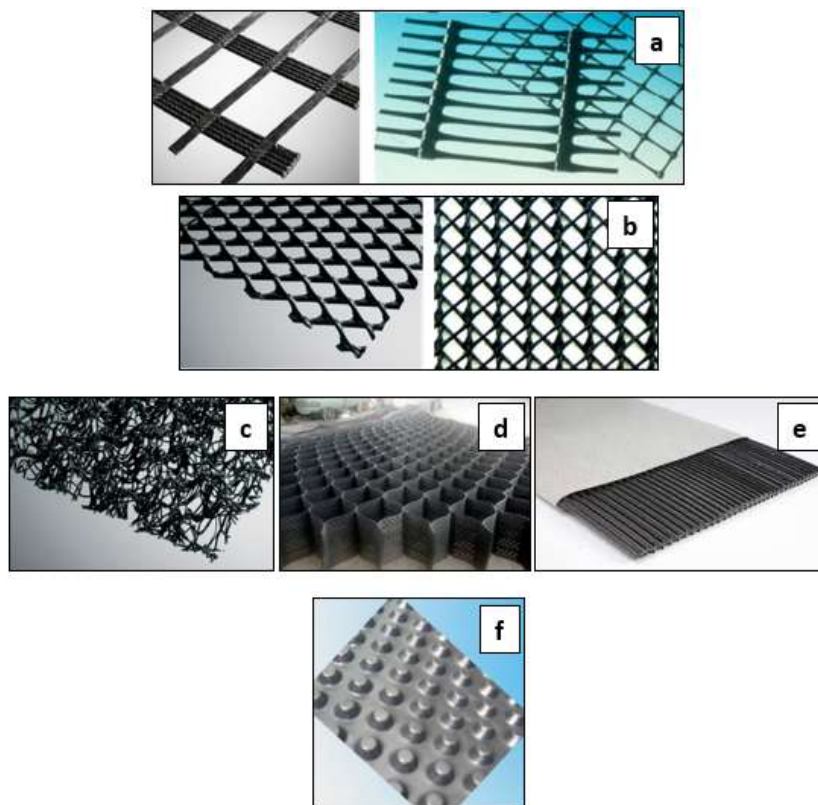


Figura 12. Ejemplos de productos relacionados con geotextiles: a) geomallas, b) georedes, c) geoestera, d) geocelda, e) geobanda, f) geoespaciador

5.1.3. Principales características a determinar

Las principales características a determinar en los geotextiles y productos relacionados con geotextiles son:

- **Características generales.** Las características generales del geotextil o producto relacionado se especifican en la norma UNE-EN ISO 10320, y se refieren a los datos que debe facilitar el fabricante o suministrador del producto para su identificación.
- **Características físico-mecánicas.** Las características físico-mecánicas, junto con las características hidráulicas, son la base de la elección de los geotextiles en función de sus aplicaciones. Las características que generalmente se determinan son:
 - o Resistencia a tracción y alargamiento (UNE-EN ISO 10319)
 - o Resistencia al punzonamiento estático (UNE-EN ISO 12236)
 - o Resistencia a la perforación dinámica (UNE-EN ISO 13433)
 - o Eficacia de la protección (UNE-EN 13719)
 - o Resistencia al punzonado piramidal (UNE-EN 14574)
- **Características hidráulicas.** Deben ser consideradas cuando el geotextil o producto relacionado realiza las funciones de filtro o de drenaje y son:
 - o Permeabilidad normal al plano del geotextil (UNE-EN ISO 11058)
 - o Permeabilidad en su plano (UNE-EN ISO 12958)
 - o Abertura característica (UNE-EN ISO12956).

- **Durabilidad.** En la normativa se cita el tiempo máximo de exposición después de la instalación del geotextil o producto relacionado, según sea su comportamiento al ensayo de resistencia a la intemperie de acuerdo con la norma UNE-EN 12224. Además, los geotextiles o productos relacionados deben cumplir, en función de su materia prima, una serie de ensayos específicos de comportamiento a diferentes medios, como son, resistencia a la hidrólisis (UNE-EN 12447) para poliéster y poliamidas, y resistencia a la oxidación (UNE-EN 13438) para polipropileno

5.1.4. Utilización en impermeabilización de balsas

En los sistemas de impermeabilización de balsas se emplean geotextiles no tejidos y productos relacionados que deben cumplir las características que especifican la norma UNE-EN 13254 *Geotextiles y productos relacionados. Requisitos para su uso en la construcción de embalses y presas*. Los valores mínimos de dichas características exigibles a los geotextiles se encuentran en el *Manual de Diseño, Construcción, explotación y Mantenimiento de Balsas*.

Estos materiales, en su aplicación dentro del sistema de impermeabilización de balsas, ejercen básicamente la función de protección de la barrera geosintética y la función de filtración dentro del sistema de drenaje del fondo de la balsa, o en taludes, bajo la barrera geosintética. También pueden ejercer las funciones de separación y refuerzo.

- **Función de protección de la barrera geosintética.** En este caso la función del geotextil es prevenir la perforación de la barrera geosintética del sistema de impermeabilización que puede producirse durante su instalación y a lo largo de su vida útil. Durante la ejecución de la obra o en cualquier operación de mantenimiento, el geotextil protegerá a la barrera geosintética del paso de personal o maquinaria que puedan provocar roturas no deseadas. Durante la explotación de la balsa, el geotextil protegerá a la geomembrana de posibles roturas producidas por la existencia de objetos punzantes en el terreno y que por la presión que ejerce el agua, pueden provocar la aparición de roturas, así como de posibles perforaciones ocasionadas por el crecimiento de raíces en la parte inferior de la geomembrana y/o de posibles debilitamientos de la lámina por rozamiento con el soporte donde está instalado. El geotextil no tejido correctamente diseñado e instalado, realizará también las siguientes funciones:
 - Absorber pequeñas tracciones producidas por grietas o cavidades del terreno.
 - Colaborar en el drenaje de aguas infiltradas o de posibles gases bajo el sistema de impermeabilización.
 - Evitar el desgaste por rozamiento de la barrera geosintética.
 - Proteger el terreno en taludes frente a la pérdida de suelo debido a movimientos de la barrera geosintética.
 - Separar el terreno de la barrera geosintética permitiendo una correcta y limpia soldadura de esta.
- **Función de filtración.** En este caso los geotextiles se utilizan para facilitar el paso del agua, reteniendo las partículas finas y evitando así la contaminación del material granular del sistema de drenaje tanto del fondo de la balsa como si lo hubiera en los taludes (o bien en su caso, una geored de drenaje sustituyendo a dicho material granular) bajo el sistema de

impermeabilización. Por lo tanto, el geotextil puede presentar la función de filtración, por separado o juntamente con la función de separación.

- *Función de refuerzo.* El geotextil, debido a su estructura rugosa, presenta un coeficiente de rozamiento elevado, de forma que si se intercala entre la barrera geosintética y el terreno se evitan pérdidas de rozamiento entre las capas de impermeabilización.

5.2. Gocompuestos de drenaje. Georedes.

Un geocompuesto es un producto ensamblado que se fabrica empleando al menos un geotextil o producto relacionado con geotextiles entre sus componentes, y que se emplea en contacto tanto con el suelo como con otros materiales en ingeniería civil para aplicaciones geotécnicas. Los geocompuestos deben cumplir como mínimo las características requeridas a cada uno de los geosintéticos integrantes de este.

Entre los más empleados se encuentra el geocompuesto "Geotextil + Geored", utilizado como elemento de drenaje para la captación y/o conducción de líquidos y/o gases. En este geocompuesto el geotextil separa y filtra el suelo donde se apoya el mismo, y evita que se colmaten los espacios vacíos de la geored por el arrastre de finos que ocasiona el flujo del agua. El espesor bajo carga de la geored influye decisivamente en la transmisividad del geocompuesto.

Los sistemas de drenaje pueden elaborarse en obra por combinación de una geored de drenaje con uno o dos geotextiles de filtro, o bien pueden suministrarse desde fábrica en forma de geocompuestos de drenaje, donde los geotextiles han sido laminados al núcleo drenante. Estos sistemas se vienen utilizando, cada vez con más frecuencia, como sustitutos de capas de material granular drenante bajo el sistema de impermeabilización puesto que presentan múltiples ventajas como, por ejemplo, un menor peso, una fácil y rápida instalación, una gran adaptabilidad en taludes, una ganancia de volumen de embalse y además son muy beneficiosos desde el punto de vista medioambiental pues evitan la extracción de áridos. Se colocan principalmente en los taludes de la balsa, aunque también pueden sustituir a la capa granular en el fondo de la balsa siempre y cuando se justifique técnicamente, con un elevado factor de seguridad. Además, se podrán utilizar como parte integrante del sistema de detección y control de fugas, si lo hubiera.

Los geocompuestos drenantes, o bien la geored de drenaje y los geotextiles de filtro instalados independientemente, deben cumplir las características especificadas en la norma UNE-EN 13252. Los valores mínimos exigibles derivados de la experiencia se encuentran en el *Manual de Diseño, Construcción, explotación y Mantenimiento de Balsas*.

Es muy importante señalar que se recomienda que el sistema de drenaje con geosintéticos sea diseñado y especificado en función de las condiciones de contorno de la obra, teniendo en cuenta, principalmente, el gradiente hidráulico (inclinación y distancia entre puntos de desagüe), la carga a soportar, el caudal estimado o calculado a evacuar y las características de los materiales, ya sean suelos o geosintéticos, en contacto con el sistema de drenaje.

6. REQUERIMIENTOS DE LAS BARRERAS GEOSINTÉTICAS POLIMÉRICAS ORIGINALES

Las cualidades exigibles a las geomembranas que constituyen los sistemas de impermeabilización dependerán de su propia naturaleza y de los requerimientos de la obra en la que vayan a instalarse. Las características exigidas a las geomembranas están recogidas en la norma UNE EN 13361 *Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas*. A nivel nacional, estas características se recogen en el *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*.

6.1. Dimensionales

La característica dimensional de mayor trascendencia en la geomembrana es su espesor. Las geomembranas se presentan en el mercado con unos espesores que oscilan entre 1 mm y 2 mm. Esta es una de las características que se ve afectada a medida que la geomembrana se degrada, especialmente en aquellas en las que se produce la pérdida de aditivos con el paso del tiempo, como es el caso de las geomembranas de PVC y EPDM.

6.2. Mecánicos

Los requisitos mecánicos de tracción y compresión que se exigen a los materiales poliméricos aportan información significativa para evaluar su comportamiento a lo largo del tiempo. La determinación de las características de tracción y alargamiento en rotura o en la carga máxima muestran la capacidad de resistir las tensiones que sufren las geomembranas, así como la adaptabilidad al terreno a lo largo de su vida útil. Por otra parte, la resistencia al impacto dinámico y al impacto estático (perforación o punzonamiento) son determinantes para evaluar el comportamiento de las geomembranas una vez instaladas. Desde el punto de vista estático, la prueba de punzonamiento proporciona datos de interés acerca del material sometido a la presión del agua y en contacto con el soporte. Una mala compactación, un lavado de taludes, una rotura y contracción del geotextil protector hacen aflorar una serie de materiales pétreos que pueden dar lugar a la rotura de la geomembrana.

La resistencia al desgarro es un factor a tener en cuenta debido a la facilidad que presentan algunas geomembranas al rasgado cuando se produce una hendidura o entalla en su superficie.

6.3. Térmicos

El comportamiento a bajas temperaturas se considera una característica prioritaria para evaluar el comportamiento de la geomembrana a lo largo del tiempo. En función del material polimérico que constituye la geomembrana, este comportamiento varía con la temperatura, por ejemplo, las geomembranas de PEAD se comportan sin grietas ni roturas a temperaturas del orden de -75°C mientras que las de PVC y EPDM no se comportan de la misma forma a esa temperatura tan extrema.

La dilatación térmica, prueba realizada a elevadas temperaturas, aporta información acerca del comportamiento de la geomembrana una vez instalada en la balsa. Un ejemplo de esto se

observa en las geomembranas de PEAD, en las que se producen pliegues cuando su temperatura aumenta por la exposición al sol y se contrae cuando ésta disminuye.

6.4. Durabilidad

Las características de durabilidad relacionadas con el envejecimiento en sus distintas vertientes: ozono, temperaturas elevadas, radiación solar, entre otras, son de gran interés para predecir el comportamiento en obra de la geomembrana, máxime cuando ésta estará completamente expuesta a la intemperie.

El envejecimiento por ozono se produce en mayor medida en las geomembranas de caucho. Esta degradación por ozono tiene lugar aun cuando su concentración en la atmósfera sea muy baja y es particularmente importante cuando el material se encuentra sometido a un esfuerzo de tracción. El ataque por las radiaciones procedentes del sol es una de las causas fundamentales de la degradación de los materiales sintéticos, por lo que las pruebas de envejecimiento son de carácter prioritario, máxime en países con abundancia de radiaciones solares, como es el caso de España.

Íntimamente relacionados con la durabilidad se encuentran las resistencias a los microorganismos, a reactivos químicos y a la penetración por raíces. Una característica de durabilidad importante es el agrietamiento por esfuerzos medioambientales, que se produce de una forma más acusada en las geomembranas de PEAD, manifestándose por la aparición de grietas en zonas que están sometidas a fuertes tensiones y aceleradas por la temperatura u otro agente externo.

6.5. Otras características

Finalmente, una de las determinaciones importantes a tener en cuenta es la resistencia a la soldadura entre los paños de la geomembrana. La unión entre paños de distintas láminas que conforman la impermeabilización de un embalse es una característica de instalación o puesta en obra, más que intrínseca del material. La unión entre paños para lograr la continuidad de la impermeabilización se puede realizar por diversos métodos, entre los que destacan la soldadura por calor, disolventes, vulcanización y mediante otros procedimientos que dependen de la clase y naturaleza del polímero. Por ejemplo, las geomembranas de PVC o PEAD se unen mediante calor mientras que las de caucho necesitan el empleo de adhesivos especiales para conseguir la soldadura. El tema es de vital importancia ya que el éxito de una buena puesta en obra depende de la ejecución de las soldaduras entre los diferentes paños de geomembrana.

7. CRITERIOS PARA LA INSPECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS GBR-P EN SERVICIO

7.1. Estado inicial de la geomembrana

Los trabajos relacionados con la instalación, así como los planes de control y vigilancia de la balsa, no se encuentran incluidos en el alcance de la Guía, ya que su objetivo es determinar las características necesarias para realizar el seguimiento de las geomembranas impermeabilizantes.

Se realizarán los ensayos iniciales a las geomembranas, que serán el punto de partida para el seguimiento posterior. Los dos casos que se pueden presentar son:

- **Balsa nueva.** Debe disponer de ensayos iniciales (punto “cero”) que serían los aportados por el fabricante (“marcado CE”). Adicionalmente a estos, se pueden determinar los ensayos que van a dar información de la evolución de la geomembrana a lo largo del tiempo y que serán los que se consideran significativos de cada material, que se encuentran relacionados en el punto 7.3.
- **Balsas ya construidas.** En este caso pueden darse dos opciones:
 - a) Que se tengan los datos del fabricante (antiguos o recientes)
 - b) No se disponga de esos datos.

Si se dispone de los datos del fabricante, estos se considerarán como punto “cero” y adicionalmente se podrán hacer aquellos ensayos que sean los más significativos de cada material, que son los que darán información de la evolución de la geomembrana a lo largo del tiempo.

Los ensayos aportados por el fabricante deben estar avalados por su control de producción y el sistema de calidad que tenga el fabricante establecido, que aseguren su fiabilidad.

En el caso de que no se disponga de datos iniciales habría que hacer los ensayos que se establecen en el punto 7.3., como punto de partida del posterior seguimiento. Para ello se tomará una muestra de la geomembrana de 2 m x 1 m.

7.2. Seguimiento. Toma de muestras

El seguimiento de la geomembrana, para conocer su estado y determinar cuándo es necesario proceder a su reimpermeabilización, constará de una inspección visual anual durante la explotación y la realización en laboratorio de una serie de ensayos sobre muestras que se extraerán de la lámina periódicamente.

De forma general, la periodicidad que se puede establecer para esta toma de muestras es:

- La primera toma de muestras para iniciar el seguimiento será en el quinto año de la instalación.
- La siguiente toma de muestras tendrá lugar en el noveno año de la instalación (garantía decenal).
- A partir del décimo año, se recomienda tomar muestras cada dos años.
- Una vez comiencen los primeros síntomas de envejecimiento, la toma de muestras deberá ser anual.

Las muestras se extraerán de la pantalla de impermeabilización y la cantidad de material a extraer, ya sea PVC, PEAD o EPDM, será:

- Seguimiento: una muestra estándar de 40 x 80 cm.
- Adicionalmente:
 - Una muestra de 40 cm x 40 cm para los ensayos de resistencia de la soldadura
 - Una muestra de 1 metro x 1 metro para el ensayo CBR.

En la figura 13 pueden verse dos muestras de geomembrana extraídas de una balsa.



Figura 13. Toma de muestras de geomembrana

A la hora de efectuar la toma de muestras para los ensayos de control, es fundamental el lugar donde se llevará a cabo la extracción. En general, el lugar idóneo será siempre el talud norte, que está orientado al sur, ya que es la zona donde las radiaciones procedentes del sol deterioran en mayor medida el material polimérico.

Además, dependiendo de los valores obtenidos, se puede hacer una toma de muestras en la zona sur de la balsa, para establecer una comparación.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la situación en relación con la altura de la balsa condiciona la degradación de la geomembrana. El comportamiento de la geomembrana no será el mismo en zonas que no llegan a cubrirse de agua, donde se encuentra la mayor parte de su vida expuesta al sol, que en zonas donde pasará su vida útil total o parcialmente sumergida.

Por lo tanto, es recomendable tomar muestras a cuatro alturas (figura 14):

1. Coronación: zona del talud expuesta permanentemente al sol.
2. Intermitente: zona del talud donde fluctúa el agua.
3. Próxima al fondo: zona del talud cubierta por agua la mayor parte del tiempo
4. Fondo: zona horizontal cubierta por agua y lodos.

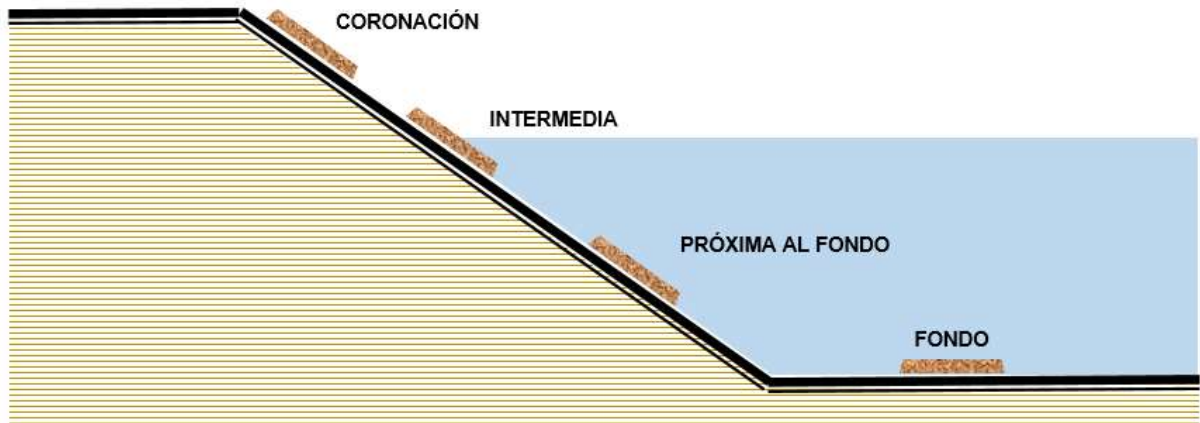


Figura 14. Esquema de toma de muestras en la balsa

En cualquier caso, si se observa una patología en una zona determinada, se tomará una muestra en ese punto.

La extracción de material deberá realizarse por personal especializado, siendo necesario en todo caso la restitución de la zona afectada, tal y como se puede ver en las figuras 15, 16 y 17, que corresponden a la reposición de material en geomembranas de PVC-P, PEAD y EPDM, respectivamente.



Figura 15. Reposición de material en geomembrana de PVC-P

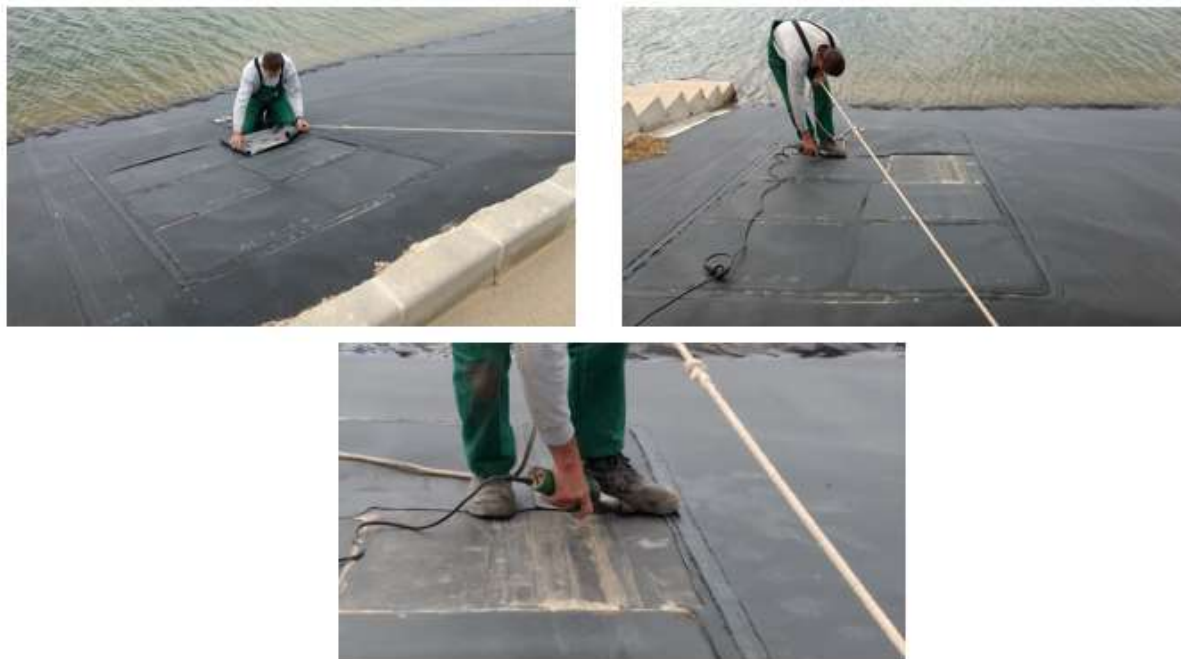


Figura 16. Reposición de material en geomembrana de PEAD



Figura 17. Reposición de material en geomembrana de EPDM

En el caso de que se quiera hacer un seguimiento más detallado de la geomembrana, que implique una mayor extracción de muestras, se recomienda colocar unos probetarios del mismo material soldados a la lámina principal, con objeto de no deteriorar en exceso la pantalla y bajo la premisa de que estos no representan realmente el comportamiento de la geomembrana ya que esta soporta tensiones y contracciones que hacen que, en general, esté más deteriorada.

El número de probetarios a instalar dependerá del tamaño de la balsa. Así, para balsas con superficie inferior a los 10.000 m², bastará con realizar un probetario, que se situará en el talud norte. En el caso de balsas con superficie comprendida entre 10.000 m² y 50.000 m², se instalará

uno más en el talud sur. Finalmente, en balsas con superficies superiores a los 50.000 m², se recomienda la colocación de cuatro probetarios, uno en cada punto cardinal.

Su tamaño será el adecuado para extraer las sucesivas muestras que se consideren necesarias en función de los ensayos que esté previsto realizar.

En la figura 18 se presentan dos ejemplos de probetarios realizados en balsas impermeabilizadas con PEAD y EPDM.

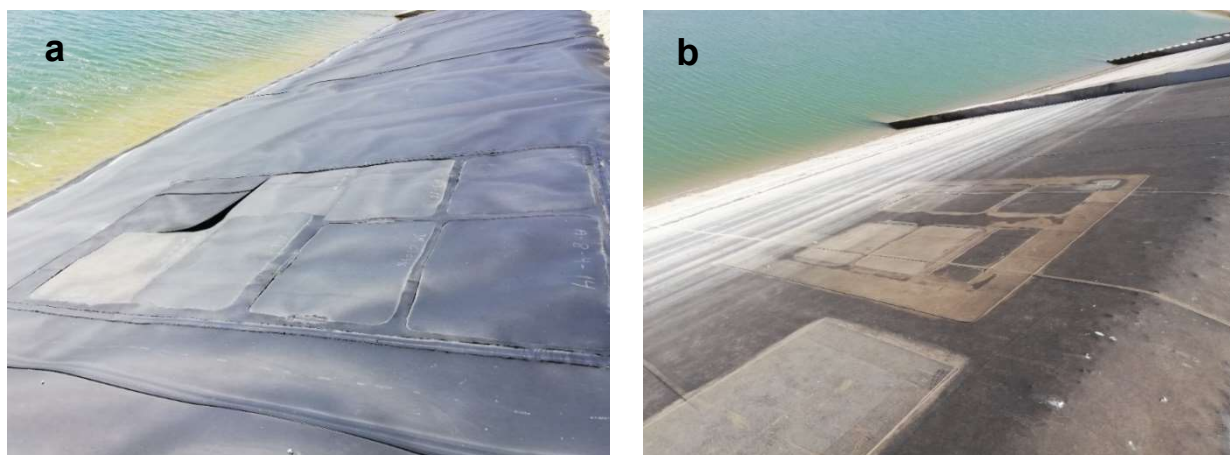


Figura 18. Probetarios en balsas impermeabilizadas con geomembrana de PEAD (a) y con geomembrana de EPDM (b)

7.3. Características a determinar en cada GBR-P

En este apartado se describen las características más significativas que proporcionan información acerca de la degradación de las geomembranas impermeabilizantes. Dependiendo de la naturaleza de cada geomembrana, es decir, del material polimérico y aditivos que las constituyen, se llevarán a cabo determinaciones específicas. Asimismo, se han establecido unos valores mínimos en cada una de las características que indicarán la proximidad del fin de la vida útil de la geomembrana

7.3.1. Poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P)

Las características más significativas en el caso de las geomembranas de PVC-P son las siguientes:

- Contenido de plastificantes
- Comportamiento a bajas temperaturas
- Alargamiento
- Resistencia de la soldadura

Los valores mínimos de las características más significativas indican la proximidad al final de la vida útil de la geomembrana y son los que se describen a continuación:

- **Contenido residual de plastificantes:**
 - Geomembranas homogéneas: obtener un valor igual o inferior al 20%
 - Geomembranas reforzadas: obtener un valor igual o inferior al 17%
- **Comportamiento a bajas temperaturas:**
 - Si el plegado se realiza a -20°C y se observan grietas, se puede considerar que la geomembrana comienza a degradarse.
 - Si el plegado se realiza a 5°C y la muestra presenta grietas visibles, se puede considerar que la geomembrana está degradada.
- **Alargamiento:** obtener una disminución del 50% del valor exigido en la normativa, es decir 125% para geomembranas de PVC homogéneas y 7,5% para reforzadas con geotextil tejido (según el RP de la marca N para Barreras Geosintéticas Rev. 6).
- **Resistencia de la soldadura:**
 - Tracción: obtener una disminución del 50% del valor de resistencia a la tracción de la geomembrana sin soldadura.
 - Pelado: las probetas ensayadas no deben experimentar deslaminación (rotura tipo A según UNE EN 12316-2). Si se produce dicha deslaminación, se dará por bueno el resultado cuando se produzca a una tensión igual o superior a 150 N/50mm, tanto en geomembranas homogéneas como reforzadas.

En la tabla 8 se resumen las características significativas de las geomembranas de PVC-P, así como los valores mínimos que indican la proximidad del final de la vida útil de la geomembrana.

Tabla 8. Valores mínimos de las características de las geomembranas de PVC-P

Características significativas	Valores mínimos
Alargamiento en rotura, %	Geomembranas homogéneas: 125
	Geomembranas reforzadas: 7,5
Contenido residual de plastificantes, %	Geomembranas homogéneas: ≤ 20
	Geomembranas reforzadas: ≤ 17
Comportamiento a bajas temperaturas	Grietas a -20°C: comienza la degradación de la geomembrana
	Grietas a 5°C: se puede considerar que la geomembrana está degradada
Resistencia de la soldadura	Método de Tracción. Valor < 50% del valor de resistencia a la tracción de la geomembrana sin soldadura
	Método de Pelado: sin deslaminar Si deslaminan, valor ≥ 150N/50mm (geomembranas homogéneas y reforzadas)

7.3.2. Polietileno de alta densidad (PEAD)

Con objeto de evaluar el estado de degradación de la geomembrana de PEAD, las características más significativas se han agrupado siguiendo dos criterios:

- a) Características que aportan información con objeto de realizar un mantenimiento predictivo de la geomembrana:
 - Determinación de la resistencia al agrietamiento por esfuerzos medioambientales (Stress-Cracking)
 - Determinación del tiempo de inducción a la oxidación (OIT)
- b) Características que aportan información para llevar a cabo la reposición de la geomembrana:
 - Resistencia a la tracción
 - Alargamiento

Los valores mínimos de las características mencionadas son los que se describen a continuación:

- a) *Características que aportan información con objeto de realizar un mantenimiento predictivo de la geomembrana:*
 - *Determinación de la resistencia al agrietamiento por esfuerzos medioambientales (Stress-Cracking):* obtener una disminución mayor o igual al 50% del valor exigido en la normativa, es decir 168 horas (según la norma UNE EN 13361, el valor de esta característica en una geomembrana original debe ser mayor de 336 horas).
 - *Determinación del tiempo de inducción a la oxidación (OIT):*
 - OIT estándar (Std): obtener un valor menor o igual a 10 min (según la norma 104427, la determinación de OIT en una geomembrana original deber ser mayor o igual a 100 min.)
 - OIT alta presión (HP): obtener un valor menor o igual a 50 min (según la norma GRI-GM13, la determinación de OIT en una geomembrana original debe ser como mínimo 400 min.).

Cuando la geomembrana alcance los valores mínimos descritos en estas dos características, se recomienda aumentar la frecuencia de las características significativas, ya que estos valores indican que ha comenzado a degradarse.

- b) *Características que aportan información para llevar a cabo la reposición de la geomembrana:*
 - *Resistencia a la tracción:* obtener una disminución del 50% del valor exigido en la normativa, es decir 13 MPa (según la norma UNE 104427, la resistencia a la tracción de una geomembrana original debe ser mayor o igual a 26 MPa)
 - *Alargamiento:* obtener una disminución del 50% del valor exigido en la normativa, es decir 350% (según la norma 104427 el alargamiento en rotura de una geomembrana original debe ser mayor o igual a 700%).

Cuando la geomembrana alcance los valores mínimos descritos en estas dos características, se debe aumentar la frecuencia de las características significativas, ya que estos valores indican que la geomembrana habría llegado al final de su vida útil y se debería considerar su reposición.

En la tabla 9 se resumen las características significativas de las geomembranas de PEAD, así como los valores mínimos que indican la proximidad del final de la vida útil de la geomembrana.

Tabla 9. Valores mínimos de las características significativas de las geomembranas de PEAD

Características significativas	Valores mínimos
Resistencia al agrietamiento por esfuerzos medioambientales (Stress-Cracking), horas	Valor \leq 168
Tiempo de inducción a la oxidación (OIT), minutos	OIT estándar (Std) \leq 10
	OIT alta presión (HP) \leq 50
Resistencia a la tracción, Mpa	13
Alargamiento en rotura, %	350
Resistencia de la soldadura	A los 5 años de su instalación
	A los 9 años de su instalación
	Pasados los 10 años

7.3.3. Etileno-propileno-monómero diénico (EPDM)

Las características más significativas en el caso de las geomembranas de EPDM son las siguientes:

- Resistencia a la tracción
- Alargamiento
- Punzonado estático (ensayo CBR)
- Dureza Shore A
- Comportamiento a bajas temperaturas

Los valores mínimos de las características más significativas son los que se describen a continuación e indican la proximidad al final de la vida útil de la geomembrana:

- **Resistencia a la tracción:** obtener una disminución del 25% del valor exigido en la normativa, es decir 6 MPa (según el RP de la marca N para Barreras Geosintéticas Rev. 6)
- **Alargamiento:** obtener una disminución del 50% del valor exigido en la normativa, es decir 150% (según el RP de la marca N para Barreras Geosintéticas Rev. 6)
- **Punzonado estático (ensayo CBR):**
 - Para geomembranas con un espesor menor de 1,5 mm: obtener un valor inferior a 0,6 KN
 - Para geomembranas con un espesor mayor o igual a 1,5 mm: obtener un valor inferior a 0,9 KN
- **Dureza Shore A:** obtener un incremento del 20% respecto al valor inicial
- **Comportamiento a bajas temperaturas:** aparición de grietas a una temperatura igual o superior a -45°C
- **Resistencia de la soldadura:**
 - Tracción: obtener una disminución del 50% del valor inicial
 - Pelado: obtener una disminución del 50% del valor inicial

De forma general, alcanzar los valores mínimos establecidos en las características significativas de cada geomembrana, indica que se debería iniciar la redacción del proyecto de reimpermeabilización de la balsa.

En la tabla 10 se resumen las características significativas de las geomembranas de EPDM, así como los valores mínimos que indican la proximidad del final de la vida útil de la geomembrana.

Tabla 10. Valores mínimos de las características significativas de las geomembranas de EPDM

Características significativas	Valores mínimos
Resistencia a la tracción, Mpa	6
Alargamiento en rotura, %	150
Resistencia a la perforación CBR	Geomembranas con espesor < 1,5 mm Valor < 0,6 KN
	Geomembranas con espesor ≥ 1,5mm Valor < 0,9 KN
Dureza Shore A	Valor > 20% del inicial Teniendo en cuenta el valor de 85 como dato relevante para considerar la sustitución de la geomembrana
Comportamiento a bajas temperaturas	Aparición de grietas a una T ^a ≥ -45°C
Resistencia de la soldadura	Método de Tracción. Valor < 3,2 kN/m
	Método de Pelado. Valor < 0,8 kN/m

7.4. Vida útil. Reimpermeabilización

La geomembrana debe ser sustituida cuando haya alcanzado el final de su vida útil, esto es, cuando deje de cumplir su función de barrera contra la infiltración del agua o líquido embalsado. La pérdida de impermeabilidad de la barrera polimérica puede darse por distintos motivos: degradación del material polimérico, fallos constructivos, condiciones climáticas, eventos naturales extraordinarios, actuaciones humanas inadecuadas u otros.

➤ *Degradación del material*

En el punto 8.2 de esta Guía se han expuesto los valores definidos como límites en las características significativas de cada material polimérico. Estos datos dan información del estado de la geomembrana e indican su grado de degradación.

Es recomendable aplicar el criterio preventivo frente al correctivo ya que las consecuencias de llevar al límite la vida útil de la geomembrana pueden ser nefastas y arriesgarse a no sustituirla es, como mínimo, temerario.

Se debería iniciar la redacción del proyecto de reimpermeabilización cuando se alcancen las siguientes circunstancias:

- En el caso de las geomembranas de PEAD, cuando el valor de OIT estándar (Std OIT) sea menor o igual a 10 minutos. Los valores límite de OIT y Stress-Cracking indican que se debería llevar a cabo un muestreo con mayor periodicidad ya que estas características se han determinado como predictivas de la degradación de la geomembrana.
- En las geomembranas de PVC, cuando los valores de contenido de plastificantes residual sean cercanos al 17% en las reforzadas con armadura de geotextil tejido o 20% en las homogéneas y cuando aparezcan grietas en el ensayo de doblado a 5°C.
- En las geomembranas de EPDM, cuando no se supere el ensayo de doblado a bajas temperaturas y se produzca una reducción del 25% en la resistencia a la tracción y/o un valor mínimo de alargamiento en la rotura del 150%.

➤ *Factores climáticos y fenómenos naturales extraordinarios*

Las geomembranas deben ser capaces de resistir las condiciones ambientales del emplazamiento en el que se encuentre la balsa. Esto debería garantizarse mediante un diseño adecuado con una correcta selección de materiales, una instalación de calidad y la realización de un seguimiento de los materiales, como se ha propuesto en el apartado 7.3. No obstante, las geomembranas pueden sufrir daños por factores climáticos y fenómenos naturales extraordinarios como, por ejemplo:

- Tormentas que puedan causar perforación por granizo.
- Succión del viento, que puede llegar a provocar la rotura de la geomembrana.
- Episodios de temperaturas extremas.
- El crecimiento de la vegetación, que puede provocar perforaciones en la geomembrana.

- Desplazamientos o deformaciones del terreno por cambios en las condiciones geotécnicas, hidrogeológicas, por sismos, etc.
- Incendios.
- Otros (ver apartado 9 sobre patologías).

En estos casos, se deberá llevar a cabo una inspección técnica para evaluar los posibles daños y decidir las acciones necesarias para restituir la impermeabilidad de la geomembrana. Estas acciones pueden ser desde reparaciones puntuales hasta reimpermeabilizaciones totales o parciales.

En las figuras 19 y 20 se observan las consecuencias del efecto de factores climáticos en dos geomembranas.



Figura 19. Efecto de succión del viento en la zona de coronación de la balsa.



Figura 20. Paso de estalladuras a roturas/brechas de más de 10 cm en el plazo de 4 meses, llegando a alcanzar algunas casi los 20 cm de longitud y 2 mm de separación por el efecto de la retracción

➤ *Defectos constructivos y fallos durante la instalación*

Además de los problemas derivados de eventos naturales, también se pueden dar fallos en el sistema de impermeabilización por acciones de origen humano, que pueden ser desde defectos constructivos hasta daños causados voluntaria o involuntariamente durante la explotación de la balsa.

La deficiente compactación de los taludes, la existencia de terrenos colindantes situados a mayor cota o la acumulación de agua sin salida adecuada que provoque encharcamientos, puede ocasionar que se produzcan filtraciones que conllevan asentamientos del terreno que dan lugar a la formación de oquedades y/o tubificaciones. Esto puede provocar tensiones en las geomembranas y su posterior rotura. Asimismo, una mala conformación del terreno soporte puede dar lugar a que afloren elementos punzantes y ocasionen daños mecánicos, como punzonamientos en las geomembranas.

A diferencia de los fallos debidos a fenómenos naturales, estos fallos no necesariamente son consecuencia de un evento puntual, por lo que deberán ser detectados durante las inspecciones rutinarias y llevados a la atención de los técnicos competentes para decidir las actuaciones correctivas necesarias. Para un mejor conocimiento de los fallos típicos de esta naturaleza se recomienda consultar el apartado 9 de este documento sobre patologías. De nuevo, la subsanación de estos fallos puede tener carácter de reparación puntual o reimpermeabilización.

7.4.1. Reimpermeabilización total o parcial

Frente a una pérdida de impermeabilidad de la geomembrana, se pueden acometer dos tipos de actuaciones:

- **Reparación:** se trata de una actuación puntual o de alcance limitado destinada a subsanar un fallo específico, como puede ser la aplicación de un parche o la colocación de un paño sobre una zona con un daño concreto.
- **Reimpermeabilización:** se trata de una actuación de mayor calibre, destinada a sustituir la geomembrana para restituir la impermeabilidad (acción correctiva) o prevenir su fallo debido a un estado avanzado de degradación (actuación preventiva), en toda la balsa o en una de sus unidades funcionales. En este tipo de actuación se tiene en consideración la configuración de los sistemas de anclaje y/o drenaje de la balsa. Por tanto, para aplicar este principio, se deben tener debidamente identificadas las distintas partes funcionales o sectores de la balsa.

En general, el envejecimiento de la geomembrana suele seguir el siguiente comportamiento:

- La velocidad de degradación suele ser creciente desde el fondo de la balsa hasta la zona de coronación. Es decir, es esperable que la parte superior de los taludes (zona emergida) se degrade antes que el fondo de la balsa (zona sumergida). Excepcionalmente, se ha observado que algunas geomembranas de PVC-P son susceptibles de sufrir mayor degradación en las zonas sumergidas que en las expuestas a la radiación solar, debido a la naturaleza del plastificante, con mayor tendencia a migrar al agua que al aire. En estos casos

se recomienda llevar a cabo el seguimiento de la geomembrana también en la zona sumergida, siempre que sea posible la extracción de muestras, con objeto de efectuar el menor daño posible en el sistema de impermeabilización de la balsa.

- A igual altura de talud, el envejecimiento es superior en la zona de mayor exposición a la luz solar y al viento. La zona norte de la balsa, orientada al sur, suele ser la que experimenta mayor envejecimiento.

Teniendo en cuenta estos comportamientos, la reimpermeabilización de la geomembrana puede realizarse en una parte o en la totalidad de la balsa.

- **Reimpermeabilización parcial**

La reimpermeabilización parcial tiene como objetivo sustituir la geomembrana solamente en aquellas partes de la balsa donde se ha detectado una mayor degradación, manteniendo la geomembrana existente en el resto de la balsa. Para poder llevar a cabo esta práctica es necesario garantizar la compatibilidad entre la lámina nueva y la existente.

Este tipo de reimpermeabilizaciones se pueden llevar a cabo mientras la balsa está en uso. En estos casos, todos los trabajos deberán realizarse en condiciones de seguridad para los trabajadores.

Es habitual aprovechar los anclajes existentes para evitar trabajos de obra civil. Si la zona a reimpermeabilizar es la de coronación, la sustitución se debería llevar a cabo entre dos bermas o líneas de anclaje, ya que se puede realizar el anclaje con suficiente seguridad y garantía de éxito. Otra opción que se puede considerar, en el caso de que la coronación tenga un avanzado estado de degradación, sería la instalación de un babero de protección para retrasar el envejecimiento de esta zona de la balsa.

Pueden surgir problemas de soldadura entre la geomembrana nueva y la antigua. En un principio los resultados de resistencia de la soldadura pueden cumplir los valores umbrales para esta característica, pero con el paso del tiempo, estas soldaduras se pueden convertir en un punto débil de la balsa, por lo que se deberá ejercer un seguimiento especial.

Asimismo, no se recomienda realizar soldaduras transversales respecto a la línea de máxima pendiente del talud ya que éstas sufren tensiones superiores a las soldaduras longitudinales entre geomembranas. Cuando las soldaduras transversales sean inevitables, se deberá garantizar que se consiguen unas resistencias de cizalla y pelado entre las láminas conectadas que permitan resistir las tensiones esperadas, tanto en el momento de su ejecución como durante la fase de operación.

- **Reimpermeabilización total**

La reimpermeabilización total de la balsa se puede producir por diferentes motivos:

- Degradación generalizada de la geomembrana en toda la superficie de la balsa.
- Existencia de tensiones debidas al anclaje en coronación que pueden dar lugar a punzonamientos, grietas y fisuras en la geomembrana.
- Aparición de irregularidades (por ejemplo, cárcavas o asientos) en el terreno de soporte, que puedan dar lugar a posibles roturas de la geomembrana al llenar la balsa.

- Cambio de la geomembrana por una de diferente material o imposibilidad de garantizar una conexión fiable a la lámina existente.
- Condicionantes de operación, como por ejemplo aprovechar un vaciado para otras actuaciones (p.ej. mejoras de las estructuras de toma o de las conducciones).

7.4.2. Elección de una nueva geomembrana

La elección de la nueva geomembrana puede depender de varios factores como la experiencia obtenida con la geomembrana antigua, la mejora de la adaptación al terreno, el coste económico de la nueva, etc.

Si la decisión conlleva la eliminación de la geomembrana antigua, se deberá examinar el talud y corregir los posibles desperfectos encontrados, así como gestionar debidamente los residuos generados.

En cambio, si se decide mantener la geomembrana antigua, pueden darse dos situaciones: que las dos tengan la misma composición o que sean diferentes materiales poliméricos. En cualquier caso, hay que asegurar que no se produzca interacción entre las dos geomembranas, ya que en determinados casos esto puede dar lugar a problemas:

- Si ambas geomembranas son de PVC-P y se colocan en contacto directo, se puede producir una migración de plastificantes desde la geomembrana nueva a la antigua. Como consecuencia, se produce una rápida degradación de la geomembrana nueva.
- Si se coloca una geomembrana de PEAD sobre otra de PVC-P, puede producirse la migración de plastificantes desde la geomembrana de PVC-P a la de PEAD. Estos pueden reaccionar con los aditivos de la geomembrana de PEAD, acelerando su degradación, proceso que se agrava por la elevada temperatura que se genera entre ambas. Normalmente se producen agrietamientos en la zona de coronación ya que es la más expuesta a la luz solar y al aumento de temperatura.

Para evitar estos problemas, en los dos casos mencionados es necesario instalar un geotextil de separación entre las dos geomembranas.

Si las dos geomembranas son de caucho de EPDM, ambas son compatibles y su instalación se puede realizar ejecutando una junta de unión o superponiéndolas sin riesgos de transferencia de aditivos entre las dos. En el caso de que la reimpermeabilización se lleve a cabo con una geomembrana de EPDM sobre una de diferente composición, se recomienda poner un geotextil de protección entre las dos geomembranas.

En general, siempre es recomendable colocar un geotextil de separación/protección entre las dos geomembranas. Deberá estudiarse y garantizarse la estabilidad de esta capa sobre el talud para evitar que pueda desprenderse.

7.4.3. Remoción de la geomembrana existente

A la hora de abordar una reimpermeabilización se debe estudiar la conveniencia de mantener o retirar la geomembrana existente. Este es un punto controvertido debido a que existen ventajas e inconvenientes en el mantenimiento de la geomembrana antigua.

Ventajas:

- La geomembrana antigua se convierte en una protección complementaria en los taludes frente a acciones mecánicas.
- Se reduce el impacto medioambiental de la reimpermeabilización al no tener que desechar la geomembrana antigua y llevar a un vertedero. Esto es importante principalmente en aquellos lugares donde el acceso a un vertedero sea complicado, como es en el caso de las islas.

Inconvenientes:

- Para evitar que entre las dos geomembranas se acumule agua, se deben hacer cortes en la inferior para llevar el agua al sistema de drenaje de la balsa. También se pueden colocar tubos respiradores para eliminar las bolsas de aire.
- Se deben tener en cuenta las distintas dilataciones y retracciones de las dos geomembranas para contar con la formación de pliegues en toda la superficie de la balsa.
- Si la reimpermeabilización incluye el fondo de la balsa, mantener la geomembrana antigua complica la limpieza de los lodos y la instalación de la nueva.
- Imposibilidad de realizar una inspección detallada del estado del soporte, sistemas de drenaje, etc.

En todo caso, se deberá garantizar la estabilidad sobre el talud de todas las capas del sistema, tanto las existentes como las nuevas.

La decisión de conservar o retirar la geomembrana antigua depende también de otros factores, como por ejemplo del estado de los taludes. Si existen cárcavas generalizadas será imprescindible retirarla para acondicionarlos. Si solo se ha producido pérdida de material en zonas puntuales, se puede sustituir solo en esos puntos. En la solera de los embalses no suele haber cárcavas, no obstante, al realizar las labores de eliminación de lodos, si son abundantes, la maquinaria utilizada puede romper la lámina y también habría que sustituirla.

En el caso de que se decida retirar la geomembrana antigua, el problema surge en el transporte y ubicación en un vertedero de la gran cantidad de residuo generado o bien la búsqueda de alternativas para su reciclaje.

8. PATOLOGÍAS POSIBLES EN EL SEGUIMIENTO DE LAS GBR-P

Se ha considerado oportuno redactar un apartado que recoja las posibles patologías detectadas en las geomembranas entendiéndolas, dentro de este sector, como *“los defectos y problemas que presenta una construcción”*. En este apartado se han mencionado los casos más frecuentes encontrados al efectuar el seguimiento de las geomembranas poliméricas, con el objetivo de que sirvan de alerta cuando se detecten y poder hacer las reparaciones oportunas en la balsa.

Las patologías detectadas en las barreras geosintéticas poliméricas utilizadas en la impermeabilización de balsas pueden tener los siguientes orígenes:

- **Composición**

La correcta formulación de la barrera geosintética polimérica, resina y aditivos, es un aspecto imprescindible para asegurar la funcionalidad de la impermeabilización.

La función del paquete de estabilización es la de proteger frente a la degradación al polímero, siendo vital la resistencia de este tanto frente a procesos físicos (volatilización, migración, extracción, etc.), como químicos (reacciones antagónicas entre ellos, reacciones no deseadas, etc.)

La pérdida o extracción de estos aditivos, bien por el contacto con agentes externos o por su migración, es algo que afectará a la vida útil de las geomembranas.

Un ejemplo de patologías de esta categoría puede ser la causada por la retracción isotrópica en las láminas de PVC-P como consecuencia de la pérdida de plastificante. En cambios de plano o zonas de curvatura donde no se haya diseñado y ejecutado un sistema de fijación adecuado, puede darse un levantamiento (pérdida de soporte) de la lámina, que comúnmente se conoce como “efecto timbal”. Un ejemplo de este proceso puede verse en la figura 21.



Figura 21. Roturas en láminas de PVC como consecuencia de la combinación de la retracción por pérdida de plastificante y los impactos de una tormenta de granizo.

- **Instalación**

La instalación se considera uno de los procesos más importantes que puede condicionar la durabilidad de las geomembranas y, por lo tanto, es fundamental la observación y el cumplimiento de lo requerido en las Normas vigentes UNE 104423 y UNE 104427, para llevar a cabo este proceso.

En esta línea hay que tener en cuenta tres aspectos fundamentales:

➤ *Preparación del soporte*

Terrenos poco o mal compactados, muy deformables, la aparición de dolinas, chimeneas o cavidades de cualquier tipo producidas en el terreno por fenómenos de erosión interna o por disolución de los materiales que lo conforman (yesos u otros materiales solubles, por ejemplo), así como eventuales subidas del nivel freático, pueden producir la degradación de las láminas situadas sobre ellos, al tener que adaptarse a unas deformaciones que, en caso extremo, podrían llegar a provocar su fallo o rotura.

La figura 22 corresponde al fallo de una geomembrana de PEAD como consecuencia de un proceso de erosión interna del dique de cierre de una balsa.



Figura 22. Fallo de una lámina de PEAD por un proceso de erosión interna del dique de cierre

En la figura 23 se observan las consecuencias del colapso de la galería del dique de cierre de una balsa, que ha dado lugar a la rotura de la geomembrana.



Figura 23. Fallo de lámina de PVC por colapso de la galería del dique de cierre

Debido a que la lámina se ve obligada a seguir todos los movimientos del terreno situado bajo ella, producidos por la carga que supone el agua almacenada en la balsa, estos deben ser objeto de vigilancia frecuente, siendo los de tipo diferencial, los asociados a materiales de características diferentes pero situados muy próximos, los más peligrosos, ya que pueden ocasionar tensiones excesivas y desperfectos importantes en la geomembrana, y en caso extremo, su rotura. Las conexiones a obras de fábrica son un punto débil habitual debido a asentamientos diferenciales (figuras 24 y 25).

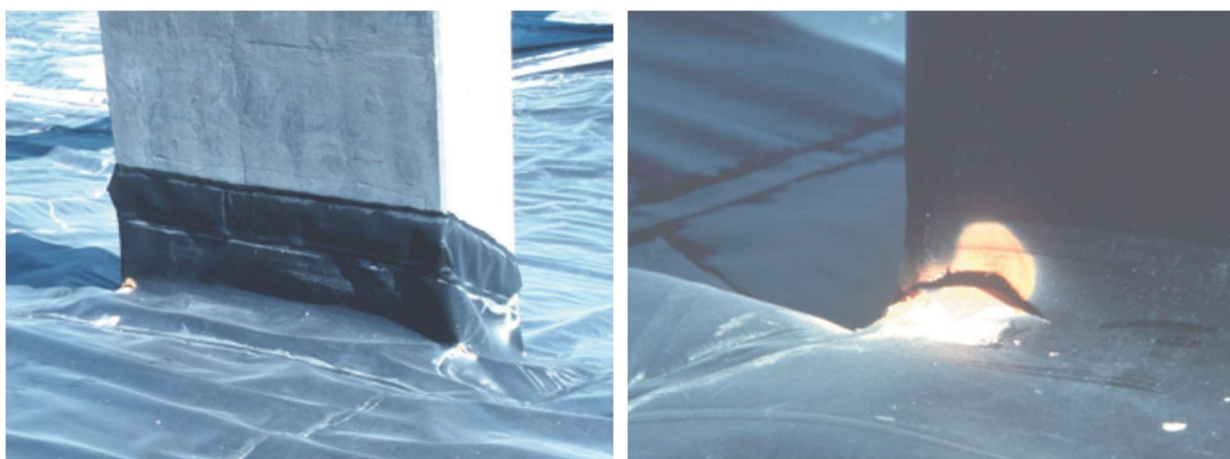


Figura 24. Rotura de lámina de PEAD como consecuencia de asentamientos diferenciales en la conexión con estructura de fábrica



Figura 25. Rotura en lámina de PVC como consecuencia de asientos diferenciales en estructura de toma

Por otro lado, el soporte debe permitir a la geomembrana cumplir su función de impermeabilización sin que elementos externos comprometan su funcionalidad. Elementos que supongan irregularidades en el soporte pueden dar lugar a punzonamientos de la lámina. El punzonamiento se produce por una concentración de tensiones y da pie a un fallo puntual, que puede propagarse y formar daños más severos si la geomembrana está sujeta a tensiones.

En las figuras 26, 27 y 28 se presentan ejemplos de punzonamientos en geomembranas de EPDM, PEAD y PVC, respectivamente.



Figura 26. Punzonamiento en lámina de EPDM (arriba) y posterior propagación de punzonamiento en forma de desgarro (abajo)



Figura 27. Plastificación (izquierda) y rotura (derecha) en lámina de PEAD por punzonamiento hidráulico debido a un canto en el soporte



Figura 28. Punzonamiento incipiente en lámina de PVC armada

Una mala conformación del soporte ya sea por desmoronamiento del hormigón poroso o el producido por bateo del viento, conduce al afloramiento de los elementos punzantes presentes en el terreno, que pueden dañar la geomembrana.

Para conseguir una adecuada calidad en la instalación sobre las superficies de asiento ya perfiladas y refinadas, se colocará un geotextil, que realizará, además, labores de protección y drenaje. Sus características se fijarán considerando los detalles del proyecto.

En la figura 29 puede verse un nuevo ejemplo de punzonamiento de la geomembrana debido al deficiente acondicionamiento del soporte se encuentra en la figura 29.



Figura 29. Punzonamiento estático por deficiente acondicionamiento del soporte

Otro posible punto de degradación está situado en el cambio de plano en la zona de coronación, al inicio del talud interior, zona donde la geomembrana está sometida a más tensión. En el caso de las geomembranas de PEAD en esta zona se pueden producir los fenómenos de agrietamiento por esfuerzo o stress-cracking. En otros tipos de geomembranas es donde se produce el mayor número de perforaciones (figuras 30 y 31). Una forma de minimizar este proceso es suavizar este ángulo con la finalidad de evitar aristas vivas.



Figura 30. Grietas en el cambio de plano en la coronación



Figura 31. Punzonamientos en la esquina superior del talud (cambio de plano) en láminas de PEAD.

El terreno también puede ser el causante de la aparición de gases que, si no se dispone de un correcto sistema de drenaje para su evacuación, pueden dar lugar a la aparición de bolsas bajo la geomembrana, conocidas comúnmente como hipopótamos o ballenas (figura 32). Estas bolsas de gas pueden llevar a la lámina a su rotura. Esta patología se ha detectado principalmente en balsas que almacenan lixiviados, aguas residuales o estanques de estiércol de granjas. En estos casos se genera metano, que se acumula debido a que la balsa no tiene un correcto sistema para su evacuación.



Figura 32. Formación de bolsas por efecto de gas acumulado debajo de la geomembrana

➤ *Almacenamiento, Transporte e Instalación*

Se recomienda tener un especial cuidado durante el transporte de los rollos de la lámina. El desenrollado y la posterior instalación de estos sobre el terreno pueden ocasionar rayaduras, punzonamientos o desgarros, de escasa envergadura pero que, a lo largo de su vida útil, podrían llegar a plantear problemas. La figura 33 presenta ejemplos de acopio de rollos de geomembranas.



Figura 33. Acopio de geomembranas para impermeabilización

Asimismo, el empleo de disolventes o cualquier otro producto junto con los medios auxiliares empleados en la puesta en obra pueden generar zonas de debilidad en la geomembrana con el consiguiente deterioro de esta.

En el caso de las geomembranas de PVC y PEAD, la instalación se llevará a cabo conforme a las Normas vigentes UNE 104427 y UNE 104423.

➤ *Soldaduras y encuentros con obras de fábrica*

Al ser la unión entre paños mediante soldaduras, principalmente mediante termofusión para PVC-P y PEAD y por adhesivos o cintas autoadhesivas para el EPDM, el proceso para efectuar las soldaduras en la práctica será el aspecto fundamental que garantice la ausencia de problemas posteriores en ellas.

Las uniones hechas en fábrica son fáciles de controlar y se realizan bajo unas estrictas condiciones conocidas de limpieza, humedad y temperatura. En obra, sin embargo, esas condiciones son mucho más variables, al depender de demasiados factores, incluso dentro de una misma jornada de trabajo, por lo que la calidad resultante de la soldadura, y su resistencia no será la misma que la efectuada en fábrica. Por lo tanto, para garantizar la seguridad de la balsa, se deberá efectuar un detallado y periódico seguimiento posterior de todas estas zonas, siempre que sea posible, a lo largo de la vida útil de la geomembrana, siguiendo las indicaciones de las normas de puesta en obra.

En las figuras 34, 35 y 36 se presentan ejemplos de desgarros y defectos en los bordes de las soldaduras.



Figura 34. Desgarro en borde exterior de soldadura en lámina de PEAD



Figura 35. Desgarro en borde exterior de soldadura



Figura 36. Defecto en unión entre paños de lámina de EPDM, fácilmente despegable con la mano

Especial atención se prestará a la ejecución de los contactos de la lámina con los distintos elementos rígidos que puedan existir en la balsa, por ejemplo, con las estructuras en las que se alojen los elementos de desagüe, aliviaderos, tomas u otros. Esas uniones pueden originar distintos fallos en la geomembrana en forma de desgarros y permitir que el agua salga y penetre por debajo de ella, con las correspondientes consecuencias negativas, que en caso extremo podrían ocasionar fenómenos de erosión interna o llegar a inestabilizar los taludes del dique de cierre de la balsa. Por ello, todas estas zonas se vigilarán con mucho detalle ante la posibilidad de que se produzcan este tipo de patologías.

En la figura 37 puede verse un ejemplo de desgarro de la geomembrana en una zona próxima a la coronación de la balsa.



Figura 37. Desgarros en la geomembrana próxima a coronación

- **Factores ambientales**

Ciertas variables de carácter ambiental imperantes u ocasionales en la zona de ubicación geográfica de la balsa pueden influir negativamente en la degradación de la lámina o causar daños al sistema de impermeabilización.

- *Temperatura*

En las geomembranas termoplásticas la temperatura y los cambios térmicos que se producen en torno a la balsa afectan a los procesos de contracción-dilatación de la lámina y, por lo tanto, afectan a las soldaduras, a la pérdida de plastificantes, al impacto dinámico o a otras características tenso deformacionales. Por este motivo, es importante llevar un control de la temperatura de la geomembrana durante las inspecciones realizadas a las balsas (figura 38).



Figura 38. Medida de la temperatura de la geomembrana durante las inspecciones

En las figuras 39 y 40 se presentan fallos en la geomembrana por efecto de la temperatura.



Figura 39. Fallo de soldadura de extrusión en lámina de PEAD por dilataciones térmicas



Figura 40. Rotura en lámina de PEAD por retracción debido a bajas temperaturas. Este fenómeno se conoce como rotura frágil y, en este caso, se observa como el soporte de la balsa queda al descubierto

En general, la temperatura o la radiación solar influyen en el envejecimiento de la geomembrana, pero esto solo se considera una patología si el envejecimiento no es coherente con el tiempo transcurrido desde la instalación de la geomembrana.

➤ *Precipitaciones*

Las lluvias pueden ocasionar, indirectamente, problemas de erosión en los taludes externos del dique, generando inestabilidades o deslizamientos del terreno que, en caso límite, podrían ocasionar la rotura de la geomembrana al tener que seguir esta los movimientos del terreno sobre el que se sitúa.

La acción del granizo puede causar en algunas geomembranas grietas en forma de “pata de gallo” que comienzan a formarse desde la parte interna a la externa de la geomembrana y siempre en zonas que en algún momento se ven expuestas a la intemperie. En las figuras 41, 42 y 43 se presentan varios ejemplos de roturas producidas en geomembranas por los efectos del granizo.



Figura 41. Efectos del granizo en la geomembrana



Figura 42. Roturas tipo estrella a causa de impactos en lámina de PVC homogénea.



Figura 43. Roturas tipo estrella a causa de impactos en una lámina de PVC armada sobre la cara anterior (izquierda) y posterior (derecha)

➤ *Viento*

La acción del viento incide directamente sobre la geomembrana y puede producir daños tales como:

- Separación de anclajes y desgarros.
- Generación de olas que deformen los taludes formando un escalón en el nivel del plano de agua.
- Bateo de la lámina, que puede dar lugar a un tamizado de la capa de regularización y la aparición de elementos que provoquen punzonamiento de la geomembrana.

En las figuras 44, 45, 46 y 47 se observan varios efectos producidos por el viento en distintas geomembranas.



Figura 44. Levantamiento del babero por la acción del viento



Figura 45. Efectos del oleaje en la balsa



Figura 46. Lámina de PEAD arrancada por succiones de viento



Figura 47. Deformación de taludes por acción del oleaje bajo geomembrana de PVC-P

- **Flora y fauna**

Existen especies vegetales capaces de adaptarse a terrenos tan áridos como los utilizados en la construcción de los diques de cierre de las balsas. Sus raíces, en busca de agua, pueden atravesar la capa asfáltica del camino de coronación y llegar a situarse inmediatamente debajo de la geomembrana impermeabilizante, ya que en esta zona suele acumularse bastante humedad.

La zarza es una de esas especies vegetales. Es muy frecuente encontrarla en la coronación de las balsas, con sus espinas situadas sobre la geomembrana, con el riesgo de daño que esto supone para la lámina.

La figura 48 presenta dos ejemplos de crecimientos de vegetación, en coronación y en la geomembrana.



Figura 48. Vegetación en coronación (a) y en la geomembrana (b)

En la figura 49 se observa el crecimiento de vegetación en el interior de una grieta de una geomembrana de PEAD.



Figura 49. Vegetación creciendo en el interior de una grieta en una geomembrana de PEAD

Por otro lado, la presencia de agua embalsada supone una zona de abrevadero para la fauna de la zona (figura 50), quedando los animales atrapados y ocasionando estos importantes daños en la lámina impermeabilizante en sus intentos fallidos de salir de la balsa. Además, los roedores se sienten atraídos por el olor y sabor característicos de los plastificantes de las láminas de PVC-P, conociéndose casos aislados de perforaciones en láminas homogéneas causadas por ellos.

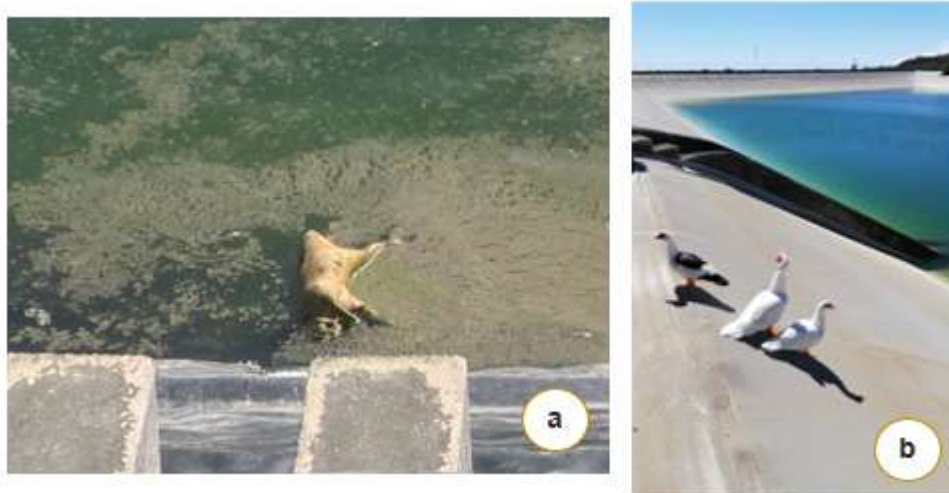


Figura 50. Animal muerto en una balsa (a) Presencia de aves en el interior de la balsa (b)

La solución a estos problemas parte de un adecuado cerramiento del embalse cimentado sobre un murete de hormigón de forma que se evite que los animales puedan atravesarlo por la parte inferior. Además, como las láminas son bastante deslizantes sobre todo en húmedo, se recomienda colocar escaleras o cuerdas prolongadas hasta el nivel del agua (figura 51).



Figura 51. Escala de animales sobre geomembrana

- **Vandalismo o usos diferentes al previsto**

El vandalismo o el uso indebido de las instalaciones de la balsa para actividades distintas al uso para el que fue concebida, como natación, piragüismo, circulación de bicicletas o motos, además de hacer peligrar al deportista, pueden dañar la geomembrana e impedir la función para la que esta fue colocada. En estos casos, es de suma importancia una adecuada señalización de peligro en la balsa, así como la instalación de elementos, como escalas de salvamento y lastres de talud, que permitan la salida de las personas (figura 52).



Figura 52. Lastres en taludes y escalas de salvamento

Como consecuencia de otros actos vandálicos, no son infrecuentes los cortes de trozos de lámina o los daños producidos por impactos debidos al lanzamiento de ciertos objetos al vaso de la balsa. En la figura 53 se observan dos ejemplos de efectos debidos a este tipo de actos vandálicos en balsas.



Figura 53. Efectos de actos vandálicos: Automóvil (a) y distintos objetos (b) arrojados al interior de las balsas

Asimismo, se han detectado perforaciones de las láminas debidas a disparos efectuados por cazadores o desgarros en lámina o soldaduras por enganches en anzuelos cuando se practica la pesca, siendo estos difíciles de localizar en inspecciones visuales rutinarias, al estar cubiertos por el agua.

- **Otras patologías**

Las aguas almacenadas en la balsa, dependiendo de sus características químicas y su calidad, pueden en ciertos casos afectar a la formulación de la geomembrana y provocar una degradación más rápida de lo esperado. El estudio de esas características y su compatibilidad con la geomembrana no puede obviarse.

El desprendimiento de fragmentos de roca de los taludes del terreno en el que se encaja la balsa puede causar, en su caída, perforaciones en la geomembrana, por lo que es recomendable estudiar cómo proteger esas potenciales zonas de desprendimientos con mallas de triple torsión u otros elementos: bulones, anclajes, etc. (figura 54).

Otro factor es el fuego, que puede producirse en la balsa, en sus instalaciones, en el camino de coronación, en el cerramiento de la balsa o en la vegetación que la contornea (figura 55).



Figura 54. Desprendimientos del talud sobre el camino de coronación



Figura 55. Lámina de PVC-P afectada por un incendio contiguo

9. BIBLIOGRAFÍA

