

# Experiencia española en el uso de geomembranas sintéticas en obras hidráulicas

MANUEL BLANCO FERNÁNDEZ (\*) y ÁNGEL LEIRO LÓPEZ (\*\*)

**RESUMEN** El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) lleva varias décadas dedicado al estudio del comportamiento de los geosintéticos, especialmente barreras geosintéticas poliméricas que forman parte del sistema de impermeabilización de diferentes obras hidráulicas, fundamentalmente, balsas.

Tanto en geotextiles y productos relacionados como en geomembranas se determinan las características iniciales; en el caso de estas últimas se realiza un seguimiento periódico a lo largo de la vida útil del material impermeabilizante.

El control que se lleva a cabo abarca más de doscientas estructuras y conlleva la inspección técnica, toma de muestras y reposición del material, pruebas experimentales y recomendaciones a seguir, con el fin de incrementar la seguridad y durabilidad de las mencionadas estructuras hidráulicas.

Por todo ello y de los datos obtenidos a través de más de dos décadas se presenta la experiencia española en este campo de la Tecnología.

## SPANISH EXPERIENCE IN THE USE OF SYNTHETIC GEOMEMBRANES FOR HYDRAULIC WORKS

**ABSTRACT** *The Spanish institution “Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)” has studied for decades the behaviour of geosynthetic products, specially the polymeric geosynthetic barriers used as waterproofing systems of different hydraulic works, mainly in reservoirs. Both in geotextiles or related products and in geomembranes, initial characteristics are determined; besides of that, periodic controls along the service life are performed in geomembranes. The monitoring of more than two hundred hydraulic structures requires technical inspections, taking samples and replacing them, experimental tests and recommendations, with the purpose of increasing security and durability in hydraulic structures. Because of that, the Spanish experience in this field of technology is presented along this paper.*

**Palabras clave:** Impermeabilización, Geomembrana, Embalses, Seguimiento.

**Keywords:** Waterproofing, Geomembrane, Reservoirs, Monitoring.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de geomembranas sintéticas en el campo de las Obras Hidráulicas surge en España en la década de los setenta en el sudeste peninsular, concretamente en la zona de Ibi, en la provincia de Alicante, donde se comienzan a instalar barreras elastoméricas a base de caucho butilo (IIR) (Blanco 2005). Con anterioridad, las balsas se estaban impermeabilizando con sistemas líquidos como el caso de El Saltadero o bien con películas o “films” de polietileno de baja densidad (PEBD) que se empleaban enterrados y que algunos han lle-

gado hasta nuestros días cumpliendo perfectamente su función como es el caso de la balsa de El Fraile en el sur de la isla de Tenerife. Con anterioridad a estas fechas se habían utilizado, de una manera testimonial geomembranas bituminosas modificadas con cauchos en algunas presas de los Pirineos, como la leridana de Aiguamoix. En el año 1968 se construye la presa del Odiel Perejil en Campofrío en el municipio de Aracena en la provincia de Huelva donde se coloca una geomembrana termoplástica de polietileno clorado (CPE) en el interior del paramento; en el año 2002 se realizaron unas catas para conocer como se encontraba al cabo de los años y, tras los ensayos pertinentes, se comprobó su perfecto estado de conservación (Blanco & Zaragoza 2003). A principios de los setenta se impermeabiliza el azud de Matavacas (Sanlúcar de Guadiana-Huelva) con una geomembrana sintética de caucho butilo que aún permanece con buenas características salvo las uniones entre paños (Cea *et al.* 2003, Blanco *et al.* 2010a). Estos inicios en el uso de las barreras geosintéticas poliméricas con la utilización de caucho butilo coincide con lo que se es-

(\*) Doctor en Ciencias Químicas. Jefe del Área de Materiales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX), Madrid, España. Vicepresidente de IGS España. E-mail: Manuel.Blanco@cedex.es

(\*\*) Licenciado en Ciencias Químicas. Coordinador Técnico Científico del Área de Materiales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX), Madrid, España. Presidente de IGS España. E-mail: Angel.Leiro@cedex.es

taba realizando en el resto del mundo, pues según datos del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD) en su Boletín nº 78 del año 1991, la primera balsa impermeabilizada con una geomembrana sintética fue la de Kualapuu, en Holokai (Hawái) y tuvo lugar en el año 1959; el material empleado era, asimismo, caucho butilo.

Los dobles enlaces, “ $\sigma$ ” y “ $\pi$ ”, existentes en la macromolécula que constituye el caucho butilo eran susceptibles de ser atacados por reactivos electrófilos, como es el caso del ozono, que aún en pequeñas proporciones, y, máxime, cuando se encuentra sometido a tensiones, es capaz de romper el mencionado enlace “ $\pi$ ” y por ello deteriorar a la geomembrana (Navarro *et al.* 1989).

El sucesor de este caucho puede considerarse al poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) que lentamente, se va introduciendo primero reforzado con hilos sintéticos y, más tarde, como material homogéneo e incluso con inserción de fibra de vidrio. Tres son los factores que han influido en su introducción en nuestro país:

- Las barreras vinílicas no eran atacadas por el ozono atmosférico, causa principal de la degradación del butilo, ya que en la estructura del polímero solo hay enlaces “ $\sigma$ ” que no son vulnerables a reactivos electrófilos como era el ozono.
- A finales de los años setenta el extinto Instituto Nacional de Racionalización y Normalización del Trabajo (IRANOR), estamento oficial responsable de la normalización en España crea un grupo de trabajo dentro del Comité 53 de “Plásticos y Cauchos” para elaborar una norma de poli(cloruro de vinilo) plastificado de uso en la Edificación. Después de esta norma, se redactaría otra para balsas. Todo ello, llevaba consigo la existencia de unos requerimientos a exigir y una metodología experimental que no se disponía con el butilo.
- El último hecho a favor del desarrollo de la barrera vinílica fue el Plan Hidráulico de la Comunidad Autónoma de Canarias que durante la década de los ochenta lleva a cabo un ambicioso programa público de construcción de embalses de riego que permitió desarrollar una tecnología cuyo método y rigor, no sólo en la fase de proyecto y ejecución de las obras sino también en el posterior seguimiento de las mismas, resulta de gran interés para aquellos que han de utilizar la técnica de aplicación de geomembranas en la impermeabilización de pequeños embalses de materiales sueltos (Amigó & Aguiar 1994). En la primera fase del proyecto se crea un órgano gestor llamado por aquel entonces Balsas del Norte de Tenerife (BALNORTE) y se construyen diez balsas de las que nueve llevan una pantalla impermeable que en todas ellas es poli(cloruro de vinilo) plastificado. Con el tiempo, el organismo autónomo local abarca toda la isla y pasa a denominarse Balsas de Tenerife (BALTEN) con quien desde el primer momento el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) establece un convenio de colaboración que se va renovando con el tiempo. El control llevado con aquellas láminas vinílicas influyó notablemente en su expansión, tanto en la Península como en los archipiélagos (Aguiar & Blanco 1995).

No obstante, no todo eran ventajas en este tipo de geomembrana pues en algunos casos la pérdida de plastificantes degradaba el material de una forma bastante rápida; en otros casos, y en el campo de la Edificación la colocación de una lámina sobre una geomembrana bituminosa conducía al fracaso de una manera acelerada por interacción de los componentes

del betún (maltenos, asfaltenos, aceites) y los relativos a la geomembrana (resinas y aditivos).

El hecho anterior favorece la introducción en nuestro país como geomembrana del polietileno de alta densidad (PEAD), cuya aplicación comienza en la Comunidad Autónoma de Castilla-León (Villalar de los Comuneros, Barco de Ávila, Payuelos) y en Canarias (San Isidro, Valle de San Lorenzo, Cuatro Caminos) (Blanco & Aguiar 1998).

Ya en el campo de los termoestables aparece el caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) que al poseer en su estructura una cantidad mínima de dobles enlaces, puesto que el dieno que interviene lo hace en una proporción inferior al 5%, no es atacado por el ozono atmosférico (Blanco *et al.* 2011).

En España, pensamos que al igual que en el resto del mundo, las tres geomembranas sintéticas más empleadas son: poli(cloruro de vinilo) plastificado, polietileno de alta densidad y caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico.

Aquí se va referir a las experiencias que se dispone de estos productos, así como de otros que se han utilizado en menor número de balsas; para ello se hará uso de los datos obtenidos en los distintos convenios de BALTEN, así como los establecidos con la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

## 2. MATERIALES

Los materiales sintéticos se clasifican según sus propiedades físicas en termoplásticos y termoestables. Esta característica es importante no sólo desde el punto de vista de su comportamiento sino, fundamentalmente, desde la óptica de su aplicación en obra y la unión entre paños.

Termoplastos o materiales 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. El polietileno y el poli(cloruro de vinilo) plastificado son dos ejemplos bien conocidos de esta categoría.

Duroplastos, materiales termoestables o termoendurecibles son aquellas materias polímeras que por acción de determinadas sustancias o catalizadores apropiados endurecen de forma irreversible. Descomponen al fundir. Están formados por macromoléculas reticuladas, que en el proceso de endurecimiento se reticulan aún más. Se incluyen en este grupo a la mayoría de los elastómeros, que son unas sustancias macromoleculares de elasticidad similar al caucho, constituidas por macromoléculas lineales unidas transversalmente por puentes de enlace (“vulcanización”).

La normativa europea considera los materiales que figuran en la Tabla 1, aunque algunos de ellos no son muy utilizados. En dicha Tabla, aparte de los termoplásticos (Tipo I) y termoestables (Tipo III) aparece un tercer grupo denominado cauchos termoplásticos (Tipo II) cuyo representante principal es el polietileno clorosulfonado (CSM), comercialmente llamado “hypalon”

La normativa a seguir para evaluar la idoneidad inicial de las geomembranas es la indicada en la norma europea UNE EN 13361; la metodología utilizada es la señalada en la citada norma, aunque también se hizo uso para la resistencia al punzonamiento de la norma española UNE 104 317 (Blanco *et al.* 1996).

La norma europea no indica nada sobre proyecto, diseño, puesta en obra y requerimientos; no es una norma de calidad sino de libre comercio por los estados de la Unión Europea y

Nomenclatura	Material básico	Tipo
ECB	Copolímeros de acrilatos/etileno y betún	I
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	
CSM	Polietileno clorosulfonado	III
CR	Caucho de cloropreno	
EPDM	Caucho terpolímero de etileno/propileno/monómero diénico	
IIR	Caucho butilo	
NBR	Caucho de acrilonitrilo/butadieno	
BR	Caucho de butadieno	
POE	Polioléfina elastomérica	

**TABLA 1.** Materiales sintéticos contemplados en la norma de impermeabilización con geomembranas.

los del Espacio Europeo que son los de la antigua Asociación Europea de Libre Comercio (EFTA). Por este motivo, y teniendo en cuenta la gran variedad de geomembranas de distinta naturaleza existente, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ha encargado al CEDEX la elaboración de un Manual que en su parte dedicada a la impermeabilización cita unas recomendaciones y unas especificaciones mínimas que figuran en las Tablas 2 y 3, para geomembranas homogéneas y reforzadas con tejido de hilos sintéticos, respectivamente.

La naturaleza de las geomembranas que se controlan en España es la siguiente:

- Poli(cloruro de vinilo) plastificado homogéneo, PVC-P (h).
- Poli(cloruro de vinilo) plastificado con inserción de fibra de vidrio, PVC-P (fv).
- Poli(cloruro de vinilo) plastificado reforzado con un tejido de hilos sintéticos, PVC-P (hs).
- Polietileno de alta densidad, PEAD.
- Polietileno de media densidad, PEMD.
- Polietileno de baja densidad, PEBD.
- Polietileno de muy baja densidad PEMBD.
- Copolímero de etileno-acetato de vinilo, EVA/C.
- Polietileno clorosulfonado, CSM.
- Polipropileno, PP.
- Caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico, EPDM.
- Caucho butilo, IIR.
- Polioléfina elastomérica, POE.
- Polioléfina termoplástica, TPO.

Los datos de durabilidad que se van a exponer son consecuencia de los resultados obtenidos a lo largo del tiempo en más de doscientas estructuras hidráulicas donde se han instalado geomembranas sintéticas (Leiro *et al.* 2002, Blanco 2009), así como de otros materiales instalados en el campo experimental de El Saltadero, donde se han colocado distintas geomembranas de materiales novedosos o de otros, que sin serlo, pertenecían a empresas de nueva implantación y cuyo comportamiento era desconocido (Aguilar *et al.* 2008).

Las características de las barreras geosintéticas poliméricas consideradas se determinaron antes de su instalación con objeto de comprobar su validez y, además, con la finalidad de poseer el punto inicial al que referirse a lo largo del tiempo. La metodología experimental empleada es la citada anteriormente en este mismo epígrafe.

Aunque los ensayos de resistencia a la tracción y alargamiento en rotura se han llevado a cabo tanto en sentido longitudinal como transversal, en el contexto y la brevedad de este trabajo, los resultados expuestos harán referencia, en todos los casos, al sentido longitudinal. Asimismo, las pruebas relacionadas con el impacto dinámico se efectuaron por ambas caras de las probetas, aunque aquí los datos serán los relativos a la perforación por la cara externa, es decir, tal como está colocada la geomembrana en la obra hidráulica. Cuando no se indique algo en sentido contrario, los resultados presentados hacen referencia a muestras extraídas en el talud norte de coronación.

Todas las pruebas realizadas originalmente han superado los requerimientos mínimos exigidos a este tipo de geomembrana en el momento de su puesta en obra.

En todos los casos se ha determinado el espesor de las muestras ensayadas comprobándose, por lo general, una ligera disminución del mismo con el paso del tiempo, lo que, en ocasiones, puede ser atribuible a la falta de homogeneidad de la geomembrana en cuanto a espesores se refiere. Este fenó-

CARACTERÍSTICA	MATERIAL												
	EVA/C	PEAD	PELBD	PEMBD	PEC	PVC-Ph	PVC-P fv	TPO	CR	IIR	EPDM	POE	PIB
Resistencia a la tracción, MPa, mín.	20	25	25	20	12	15	10	20	10	8	9	15	3
Esfuerzo en el punto de fluencia, MPa, mín.	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Esfuerzo al 300% de alargamiento, MPa, mín.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,1	6,0	-	-
Alargamiento en rotura, %, mín.	750	700	750	1000	300	250	200	500	250	300	400	700	500
Alargamiento en el punto de fluencia, %, máx.	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Doblado de bajas temperaturas	Sin grietas												
Resistencia al desgarro, N/mm	60	140	100	75	35	50	50	60	35	35	35	85	20
Resistencia al impacto dinámico													
- Altura del percutor, mm, mín	500	500	500	500	500	500	500	500	300	300	300	500	500
Resistencia al punzonamiento:													
- Recorrido del percutor, mm, mín	50	8	-	45	25	20	20	25	30	30	30	25	30
Contenido en negro de humo, %	-	2,0-3,0	2,0-3,0	2,0-3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLA 2. Requerimientos a una geomembrana sintética homogénea.

CARACTERÍSTICA	MATERIAL			
	PVC-P	CSM	PP	PEMBD
Resistencia a la tracción, N/50 mm, mín.	1.100	1.100	1.100	1.000
Alargamiento en el punto de carga máxima, %, mín.	15			
Doblado a bajas temperaturas	Sin grietas			
Resistencia al desgarro, N	130	550	500	350
Resistencia al impacto dinámico:				
- Altura del percutor, mm, mín.	500			
Resistencia al punzonamiento:				
- Recorrido del percutor, mm, mín.	12	10	30	10

TABLA 3. Requerimientos a una geomembrana sintética reforzada con tejido de hilos sintéticos.

meno se hace patente, fundamentalmente, en el poli(cloruro de vinilo) plastificado lo que parece ir paralelo a la pérdida de plastificante, no obstante hay que tener en cuenta que también influye el contenido de la resina que se va degradando y otras aditivos que van migrando de la propia lámina.

### 3. SEGUIMIENTO

Una vez instalada la geomembrana sintética se debe realizar un control periódico del material para ver el estado del mismo y así determinar el momento adecuado para una reimpermeabilización o reparación. Complicada se presentó la tarea de determinar qué pruebas deberían realizarse para conocer el estado de la geomembrana, siempre ateniéndose al principio de consumir la mínima cantidad de material y obtener datos representativos del “estado del arte” en ese momento. Con pocos fallos y con muchos aciertos se fijaron una serie de pruebas que la mayoría con la, experiencia obtenida, figuran hoy en la normativa de puesta en obra y control de embalses. Las pruebas a realizar durante el control periódico dependerán del tipo de

material utilizado (Blanco *et al.* 2008a). Las más comunes, en obras hidráulicas, son las siguientes:

- Espesores.
- Características de tracción.
- Doblado a bajas temperaturas.
- Resistencia mecánica a la percusión (Impacto dinámico).
- Resistencia a la perforación (Impacto estático).
- Contenido en plastificantes (PVC-P).
- Resistencia al desgarro (PEAD).
- Negro de carbono y su dispersión (PEAD).
- Resistencia de la soldadura por tracción.
- Resistencia de la soldadura por pelado.
- Microscopia óptica.
- Microscopia electrónica de barrido.

El comportamiento a lo largo del tiempo de estos materiales se consiguió con un control periódico para lo cual se realizaron visitas de inspección al mismo y se procedió a la correspondiente toma de muestras. Inicialmente, la toma se

muestras se hizo semestral, pero con la experiencia alcanzada se decidió llevarla a cabo anual.

La extracción de muestras de ensayo y su posterior reposición puede evitarse, al menos, los primeros años dotando la estructura de una serie de probetarios que se ubicarán en distintas zonas del embalse según la envergadura de éste; así uno podría ubicarse en solera y el resto deberían situarse en taludes. Es importante la instalación en la zona norte y que abarque áreas de material totalmente sumergido, en inmersión intermitente y a la intemperie en la zona alta de coronación. En caso de colocar solo un probetario convendría situarlo en la coronación del talud norte.

### 3.1. DOBLADO A BAJAS TEMPERATURAS

Las muestras de geomembranas de los materiales considerados se sometieron a una prueba de flexión a bajas temperaturas; para ello se doblaron sobre si mismas un ángulo de 180°, después de permanecer 5 horas en una cámara frigorífica a una temperatura determinada. Posteriormente se observó si aparecían síntomas de agrietamientos, roturas u otras imperfecciones superficiales.

La temperatura de doblado depende de la naturaleza de la macromolécula que constituye la barrera geosintéticas polimérica y es una prueba para comprobar la idoneidad del material. Las temperaturas a las que se ha efectuado el doblado son las que figuran en la Tabla 4. La prueba ha sido superada por todas las barreras geosintéticas originalmente.

CSM, IIR	-40
EPDM	-55
PEAD, PEMD, PEBD, PEMBD, TPO, POE, PP	-75
PVC-P, EVA/C	-20

TABLA 4. Temperatura de flexión según la naturaleza de la geomembrana sintética.

### 3.2. DUREZA SHORE

La dureza Shore-A se ha determinado en el caso de todos los materiales termoestables ensayados, mientras que en los productos termoplásticos se halló la dureza Shore-D. Los valores alcanzados figuran en la Tabla 5. Cabría destacar de los resultados obtenidos el incremento experimentado por los cauchos de EPDM e IIR y la poca variación observada en los polietilenos de distintas densidades, donde la dureza tiende a bajar ligeramente.

### 3.3. RESISTENCIA AL DESGARRO

La Figura 1 refleja la evolución de la resistencia al desgarro con el tiempo en las geomembranas de polietilenos. Lo más destacable son los valores superiores del material de alta densidad frente a los densidades inferiores.

Años desde su instalación	Material							
	PEAD*	PEMD	PEBD	PEMBD	EVA/C	TPO	EPDM	IIR
0	58	47	44	46	32	31	58	58
5	61	47	43	44	37	35	67	68
10	58	48	42	41	35	-	75	69
15	58	47	42	-	36	-	79	71

\* En los termoplásticos la dureza es Shore-D, mientras que en los termoestables es Shore-A.

TABLA 5. Evolución de la dureza Shore con el tiempo.

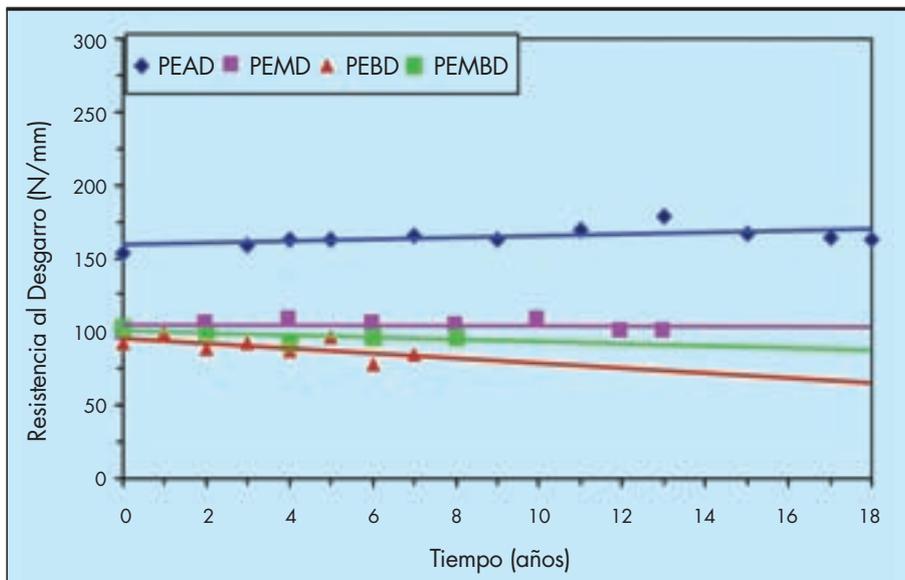


FIGURA 1. Resistencia al desgarro de polietilenos.

Material	Tiempo de instalación, años									
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
PVC (h)	21.6	21.9	22.9	22.1	21.7	21.9	20.6	24.5	22.3	21.0
PVC (fv)	14.1	14.4	15.7	15.0	17.1	15.4	16.6	16.2	18.5	16.8
PEAD	27.0	29.0	27.9	27.1	25.9	28.9	25.1	22.9	26.8	24.4
PEMD	24.6	22.8	23.1	20.7	21.9	21.0	21.0	21.2	20.1	-
PEBD	25.5	21.9	15.5	16.4	15.7	-	16.9	-	-	-
PEMBD	37.2	43.3	34,6	-	32.8	-	-	-	-	-
EVA/C	22.5	22.0	19.4	19.2	19.7	18.4	19.9	18.8	18.2	19.3
EPDM	12.6	12.5	12.8	13.3	12.5	13.1	13.4	13.1	12.2	12.5
POE	19.5	17.6	18.5	16.5	18.8	18.1	19.2	21.0	19.2	20.6
TPO	9.4	9.1	9.0	9.1	-	-	-	-	-	-

**TABLA 6.** Evolución de la resistencia a la tracción (MPa) en función del tiempo en geomembranas homogéneas de distinta naturaleza.

### 3.4. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y ALARGAMIENTO EN ROTURA

En la Tabla 6 se presentan datos de la evolución de la resistencia a la tracción, expresada en MPa, en función del tiempo para geomembranas homogéneas o con refuerzo de inserción de fibra de vidrio. Asimismo en la Tabla 7 se muestra el correspondiente alargamiento en la rotura, en %. Los valores

del citado alargamiento tienen una tendencia a la disminución con el tiempo de aplicación que se hace más notable en el caso del EPDM. En ambas tablas se puede observar el comportamiento de los distintos materiales ensayados, tanto termoplásticos como cauchos. La Tabla 8 refleja las características mecánicas de geomembranas reforzadas con tejidos de

Material	Tiempo de instalación, años									
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
PVC (h)	347	324	311	269	274	256	242	244	248	236
PVC (fv)	248	227	209	207	183	172	172	173	158	188
PEAD	898	808	793	773	765	781	753	664	774	797
PEMD	747	688	738	708	718	667	625	692	666	-
PEBD	481	466	531	537	404	-	312	-	-	-
PEMBD	756	744	738	-	756	-	-	-	-	-
EVA/C	888	771	733	737	785	745	746	760	683	762
EPDM	527	436	396	350	336	314	326	266	225	193
POE	814	716	788	764	762	717	713	759	710	746
TPO	517	448	480	462	-	-	-	-	-	-

**TABLA 7.** Evolución del alargamiento en rotura (%) en función del tiempo en geomembranas homogéneas de distinta naturaleza.

Material	Característica	Años desde su instalación			
		0	5	10	15
CSM	Resistencia a la tracción, N/50 mm	1.500	1.495	1.510	1.483
	Alargamiento en el punto de carga máxima, %	29	34	30	28
PP	Resistencia a la tracción, N/50 mm	1.810	1.570	1.420	1.430
	Alargamiento en el punto de carga máxima, %	28	29	31	25
PVC-P	Resistencia a la tracción, N/50 mm	1.325	1.422	1.488	1.467
	Alargamiento en el punto de carga máxima, %	22	23	24	22

**TABLA 8.** Características de tracción en las geomembranas reforzadas con tejido de hilos sintéticos.

hilos sintéticos; en este caso las resinas base de los geosintéticos son polietileno clorosulfonado (CSM), polipropileno (PP) y poli(cloruro de vinilo) plastificado. En este caso el textil de la armadura es el responsable de estas características y las variaciones dependen del número de hilos que intervengan en una determinada probeta y de la linealidad de la trama y urdimbre tanto en la toma de muestras como en su confección en el laboratorio. Cuando las radiaciones solares procedentes del sol atacan lo suficiente a la resina, ésta empieza a desaparecer y la armadura se encuentra a merced de las citadas radiaciones y el poliéster se degrada con relativa facilidad, notándose entonces una disminución notable tanto de la carga como del alargamiento.

### 3.5. RESISTENCIA AL IMPACTO

Desde el punto de vista del impacto dinámico, las muestras de geomembranas termoplásticas deben superar la prueba de resistencia mecánica a la percusión que consiste en lanzar el percutor de 0.5 kg con extremo en forma de semiesfera de 12.7 mm de diámetro, desde una altura de 500 mm. La lámina no debe sufrir perforación en la zona de impacto, como se pone de manifiesto al realizar una posterior prueba de estanquidad. En el caso de las termoestables la altura de caída del percutor fue de 350 mm, produciéndose un hecho relevante pues al cabo de unos años de instalación del material supera las altura de lanzamiento del dardo desde los 500 mm que se exige a los termoplásticos, el fenómeno podría deberse a procesos de un a total reticulación del caucho.

La Tabla 9 representa los valores de la resistencia al punzonamiento y el recorrido del punzón antes de perforar de catorce geomembranas, todas ellas de distinta naturaleza. A nivel general, la resistencia al punzonamiento se incrementa con el paso del tiempo, a la vez que disminuye el recorrido del percutor antes de perforar; esta disminución es más importante en el caso de los cauchos, no obstante su valor al cabo de los años de exposición es superior a la inicial de muchos ter-

mooplásticos. El comportamiento al impacto estático es, notablemente, mejor en los cauchos, copolímero de etileno-acetato de vinilo, polipropileno, poliolefinas y poli(cloruro de vinilo) plastificado homogéneo, mientras que bajo la óptica del impacto dinámico las geomembranas de PEAD, CSM y PVC-P (hs) son las de mejores resultados. Se puede considerar que el comportamiento frente a los dos tipos de impacto es inversamente proporcional.

### 3.6. NEGRO DE CARBONO

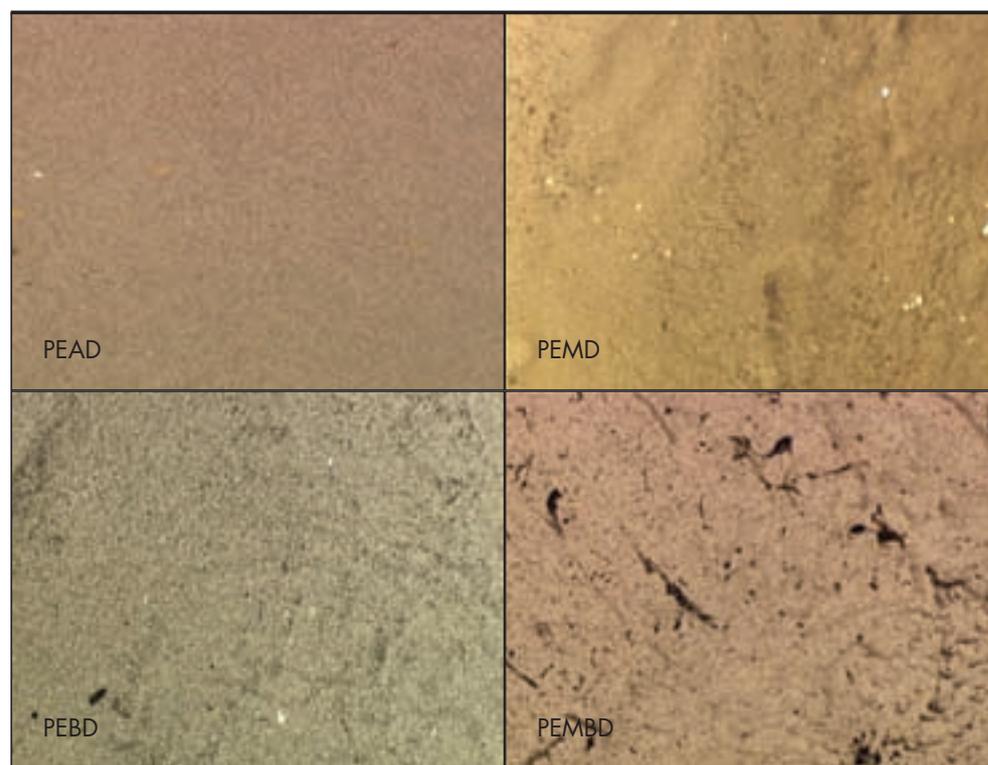
El contenido en negro de carbono o de humo ha sido del orden del 2.5% en los polietilenos, correcto ya que estaba comprendido entre el 2 y el 3% que es lo recomendado. La Figura 2 muestra la dispersión del negro de humo de las barreras geosintéticas poliméricas de polietileno cuya asignación fue siempre inferior a 3 en una escala 1-7, donde cuanto más bajo es el guarismo, mejor es la citada dispersión.

### 3.7. RESISTENCIA DE LAS SOLDADURAS

En la aplicación del método de tracción para conocer el estado de la resistencia de la soldadura se comprueba si la rotura se produce en la unión entre paños o en el borde o en las proximidades de la soldadura, pero fuera de la unión propiamente dicha; la prueba se considera correcta cuando la rotura no se produce en la unión. No obstante, este tipo de ensayo se puede considerar cualitativo y es válido para conocer el estado de la unión entre paños, pero sus valores no dejan de ser los de una resistencia a la tracción en el sentido transversal. En los casos que pudo llevarse a cabo, porque la superficie adherida entre las láminas lo permitía, se realizó la prueba cuantitativa por el denominado procedimiento de pelado que condujo al mejor comportamiento del PEAD; en el lado opuesto se encontró el EPDM y el poli(cloruro de vinilo) plastificado homogéneo cuyas uniones entre paños se realizaron con adhesivos. La Tabla 10 muestra los valores alcanzados en geomembranas de distinta naturaleza.

Material	Años de instalación	Resistencia al punzonamiento, N/mm		Recorrido, mm	
		Cara externa	Cara interna	Cara externa	Cara interna
CSM	16	512	398	12	10
EPDM	18	354	351	25	27
EVA/C	18	366	335	40	48
IIR	33	304	297	27	27
PEAD	19	695	540	15	13
PEBD	9	703	660	21	20
PEMBD	8	579	513	52	48
PEMD	14	574	535	20	20
POE	13	310	282	42	37
PP	16	269	241	40	41
PVC-P (fv)	17	710	696	20	21
PVC-P (h)	21	844	810	30	27
PVC-P (hs)	22	493	434	11	10
TPO	6	208	192	33	29

TABLA 9. Resistencia al punzonamiento estático.



**FIGURA 2.** Dispersión del negro de carbono de las geomembranas de polietileno.

Material	Años de instalación	Por tracción	A pelado
CSM	16	1310	247
EPDM	11	381	68
EVA/C	18	347	385
IIR	33	220	-
PEAD	19	1565	1290
PEMBD	8	807	710
PEMD	14	823	-
POE	13	493	307
PP	11	542	244
PVC-P (fv)	17	930	551
PVC-P (h)	21	760	142
PVC-P (hs)	22	1387	353
TPO	6	325	520

**TABLA 10.** Resistencia de la soldadura, N/50 mm.

### 3.8. MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA DE BARRIDO

La evaluación microscópica de las geomembranas se ha efectuado en las condiciones experimentales indicadas en la bibliografía (Blanco *et al.* 2002, Soriano *et al.* 2010). Las microfotografías de la observación por microscopia óptica de reflexión (MOR) se han tomado a aumentos de (x 40) y (x 60) con objeto de ver sus texturas y morfología. Asimismo, se ha comprobado el estado de las citadas geomembranas por mi-

croscopia electrónica de barrido o “scanner”(MEB) a (x 90) y (x 900) aumentos.

La Figura 3 corresponde a dos membranas de caucho butilo (IIR) y caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) originales observadas por microscopia óptica de reflexión (MOR) y microscopia electrónica de barrido (MEB). La Figura 4 muestra una geomembrana de EPDM a los 11 años de su instalación por ambas caras; en ella se puede observar el deterioro que ha experimentado la

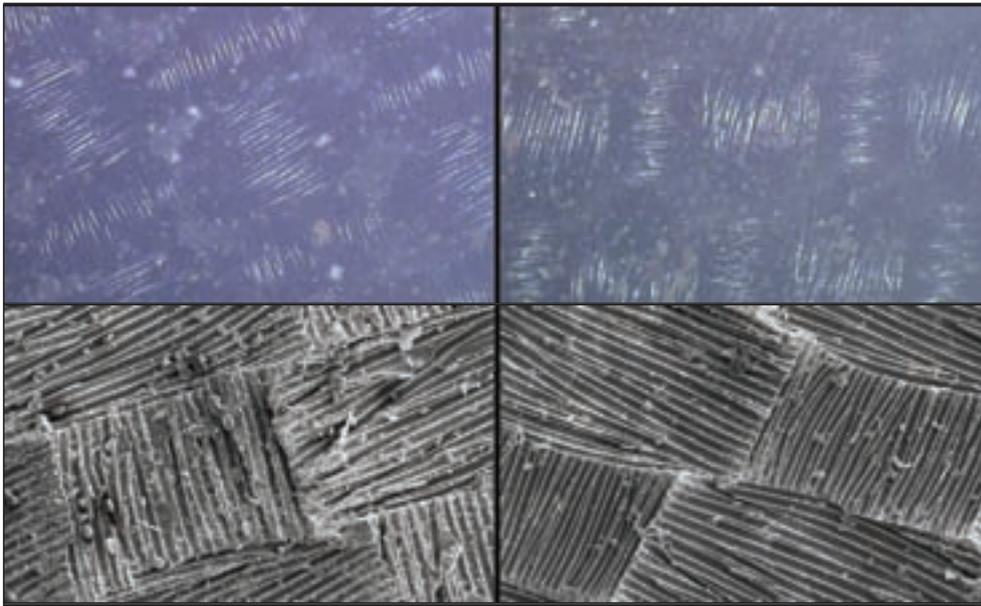


FIGURA 3. Muestras originales de IIR y EPDM observadas por MOR (x 60) y MEB (x 90).

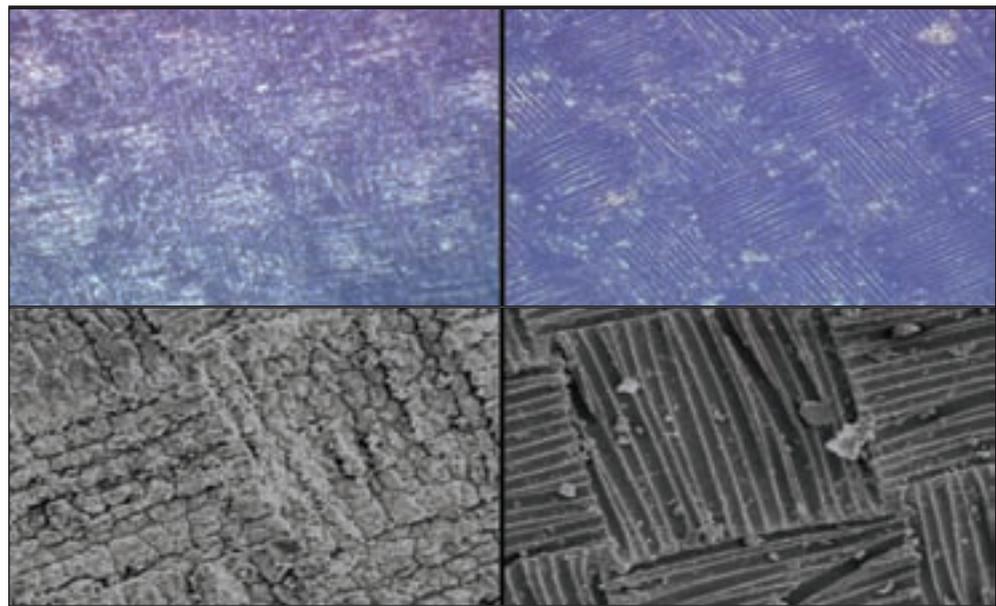


FIGURA 4. Muestras de EPDM, cara externa e interna, a los 11 años de instalada observada por MOR (x 60) y MEB (x 90).

cara externa. Las microfotografías de los cauchos que aparecen en las figuras anteriores presentan una especie de entramado que puede recordar a una lámina reforzada con tejido de hilos sintéticos, sin embargo en todos los casos se trata de láminas homogéneas, lo que detectan estas técnicas microscópicas son las huellas del textil utilizado en el proceso de vulcanización.

La Figura 5 muestra a cuatro polietilenos de distintas densidades a los 8 años de instalados en obra por su cara externa. Se han observado por MOR a 60 aumentos y MEB a 900 aumentos. El material en mejor estado es de baja densidad puesto que es el único material que se encuentra enterrado y por ello no es atacado por las radiaciones ultravioletas.

La Figura 6 muestra en su parte izquierda a una geomembrana de PVC-P original observada por MOR (x 40 y x60) y

MEB (x 90 y x 900); se puede comprobar una superficie homogénea y uniforme. En la parte derecha de la misma, se presenta una geomembrana de PVC-P a los 15 años de aplicada en obra; se puede detectar una notable degradación en la cara externa, siendo más importante en la muestra extraída en la zona norte.

### 3.9. PLASTIFICANTES

El poli(cloruro de vinilo) es un material rígido que, como tal, se emplea en el campo de la construcción; sin embargo, para ser utilizado como lámina impermeabilizante se precisa que sea flexible, lo que se puede conseguir mediante plastificación interna, procedimiento económicamente caro, o bien por plastificación externa, por la adición de plastificantes, que en general, son ésteres de elevado peso molecular (> 300).

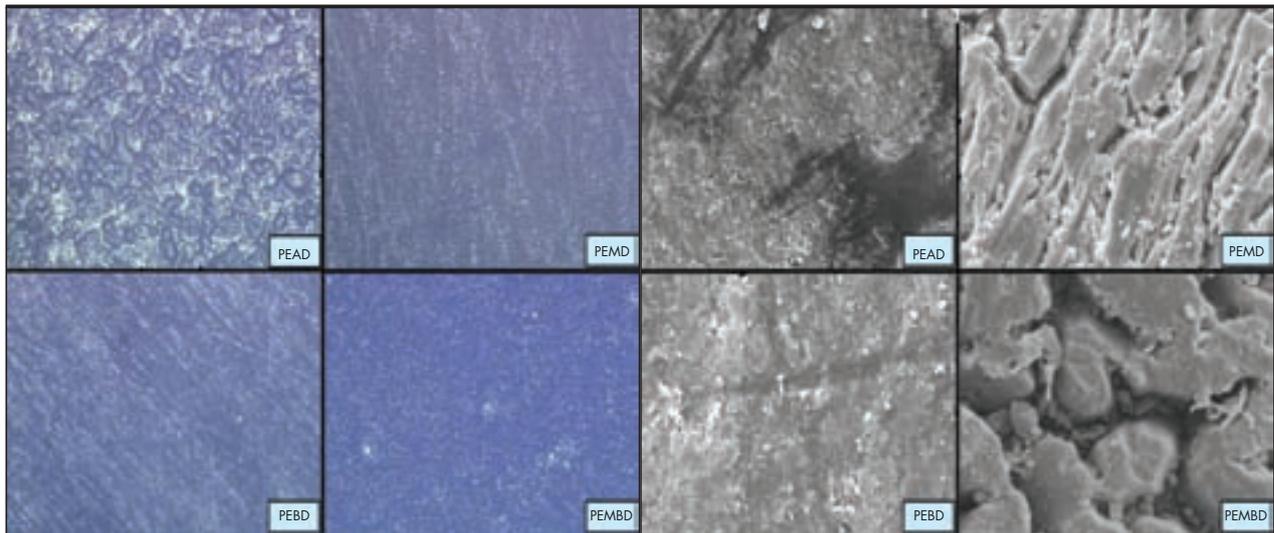


FIGURA 5. Muestras de polietilenos de distintas densidades por su cara externa a los 8 años de instaladas observada por MOR (x 60) y MEB (x 900).

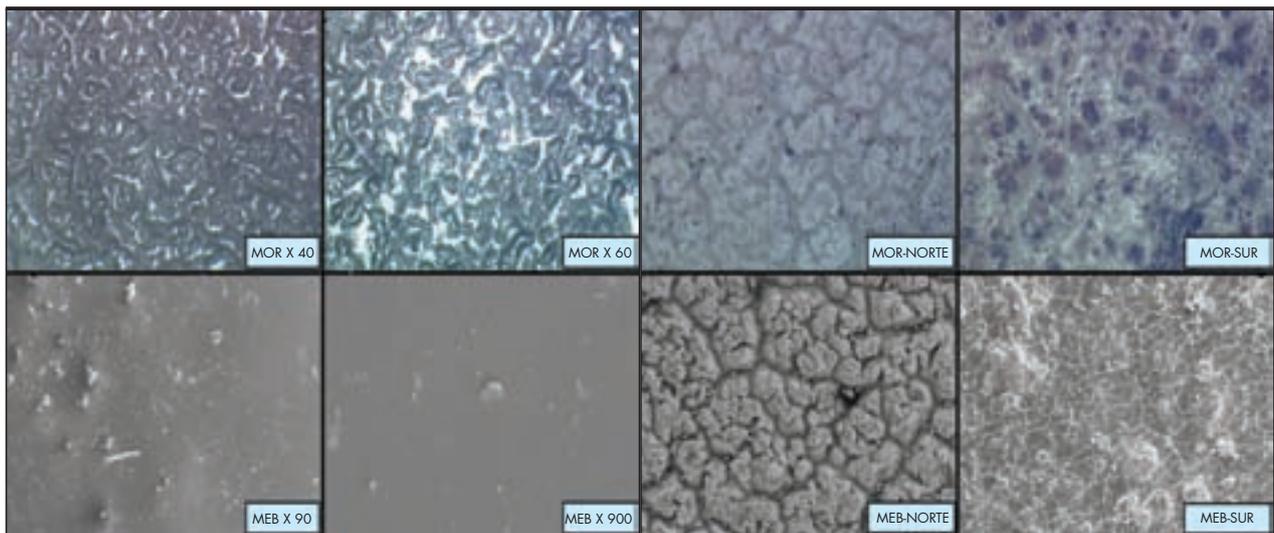


FIGURA 6. Muestras de PVC-P originales (izquierda) y a los 15 años de instaladas (derecha) observadas por MOR (x 60) y MEB (x 90).

La migración de plastificantes puede tener lugar al aire, al agua o un sólido de contacto como puede ser el terreno o bien otro geosintético. Como quiera que los aditivos utilizados como plastificantes son ésteres, la pérdida de plastificantes será función de su peso molecular, linealidad de los radicales alquilo de los protones sustituidos del ácido y de la polaridad. Teniendo en cuenta que la polaridad va a ser la misma (-COO-) los otros dos factores serán los responsables de la durabilidad de la geomembrana (Krauskopf 1993). En la Figura 7 se puede observar la disminución de plastificantes de tres láminas de PVC-P.

La evolución del contenido en plastificantes se puede ajustar a una recta del tipo  $y=ax+b$ , donde  $a$  es la pendiente y  $b$  la ordenada en el origen, esto es el contenido en plastificantes inicial. Cuando  $a$  sea 0 quiere decir que no hay pérdida de plastificantes y, en general, cuanto más próximo sea a 0 mejor será el comportamiento de la geomembrana desde este punto

de vista. En la Figura 7 salen tres rectas cuyas ecuaciones son las siguientes:

$$\text{PVC-P (h)} \quad y=-0.5849x+31.973$$

$$\text{PVC-P (fv)} \quad y=-0.6785x+35.621$$

$$\text{PVC-P (hs)} \quad y=-0.5640x+34.920$$

En este ejemplo significaría que la geomembrana de mejor comportamiento correspondería a la reforzada con tejido de hilos sintéticos, seguida de la geomembrana homogénea y, por último, la reforzada con fibra de vidrio. Pero este hecho no es general, ya que el mejor o peor comportamiento no depende de si la lámina es homogénea o reforzada sino del tipo de plastificantes que entren a formar parte de su composición.

En la Tabla 11 se observa que la pérdida es mayor en coronación, inferior en zonas intermedias y más baja en la proximidad del fondo como se puede comprobar en los datos proce-

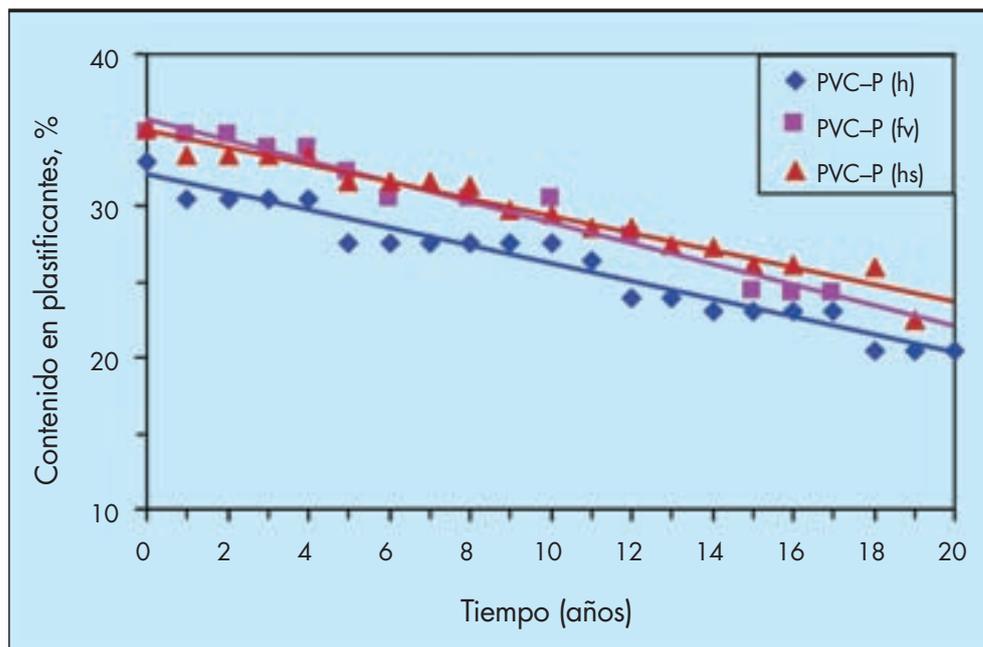


FIGURA 7. Evolución de la pérdida de plastificantes en geomembranas de PVC-P.

TALUD	ZONA		
	Coronación	Intermedia	Sumergida
Norte	26,1	27,2	28,1
Sur	27,4	27,6	27,9

TABLA 11. Contenido en plastificantes (%) en función de la orientación y de la zona de extracción de muestras de La Laguna de Barlovento.

PLASTIFICANTE %	ZONA NORTE		ZONA SUR	
	Coronación	Próxima al agua	Coronación	Próxima al agua
Contenido	23,9	18,9	27,4	19,5
Pérdida	27,4	42,8	16,7	40,7

TABLA 12. Contenido y pérdida de plastificantes en el embalse de La Florida.

dentes del embalse de La Laguna de Barlovento. La orientación es determinante para la vida útil del plastificante, siendo más importante su disminución en las muestras procedentes del talud norte. En la Tabla 12 se presentan los valores obtenidos para el contenido y pérdida de plastificante en la geomembrana del embalse de La Florida; aquí la disminución es mayor en las zonas cubiertas por el agua, es decir, al contrario que el caso anterior (Blanco *et al.* 2009).

Las Tablas 11 y 12 muestran además la importancia que tiene la orientación del material en la durabilidad de una geomembrana. En ambos casos la mayor pérdida corresponde al talud norte por estar dirigido al sur, es decir al ecuador, ya que estamos en el hemisferio norte (Aguar *et al.* 2002, 2003).

Para explicar esa forma de comportamiento contradictoria de unas láminas a otras, se ha procedido a identificar cualitativa y cuantitativamente el conjunto de plastificantes de las geomembranas.

El contenido en plastificantes se ha determinado empleando los métodos citados en la normativa actual, es decir, se extrae el plastificante con éter etílico y se separa así la micromolécula orgánica de las cargas y la resina macromolecular (UNE 104 306).

Una vez aislado el plastificante se sometió, en primer lugar, a un análisis por infrarrojo con transformada de Fourier en un aparato Nicolet 310 FT-IR, donde aparecen perfecta-

mente diferenciadas las bandas correspondientes a ftalatos de alquilo (Blanco *et al.* 2008b, Crespo 2011).

La identificación del aditivo se llevó a cabo utilizando la técnica de Cromatografía de Gases combinada con la Espectrometría de Masas (CG-MS). Para ello, se usó un cromatógrafo GC Agilent 6890N con una columna capilar de fenilmetilpolisiloxano DB%-MS acoplada a un sistema de detector de masas cuadrupolo Agilent 5793 MSD en modo de impacto electrónico. La primera de las técnicas permite conocer y separar el número de productos que constituyen “el plastificante” y la segunda, la identificación de las fracciones elucidadas (Blanco *et al.* 2010b).

La cromatografía de gases generó unos cromatogramas que en el caso de la geomembrana procedente de La Laguna de Barlovento (Fayoux 2004) daba un único pico que se identificó por espectrometría de masas como el ftalato de diisodécilo (Figura 8), mientras que en el caso de La Florida aparecían tres picos a tiempos de retención 12.90, 13.85 y 14.81 minutos, en porcentajes de 29, 39 y 32, respectivamente, lo que es indicativo de la existencia de tres plastificantes diferentes en la formulación de esta lámina, como se muestra en la Figura 9.

A continuación, los distintos productos aislados se sometieron a una espectrometría de masas cuyos resultados fueron los mostrados en las Figuras 8 y 9.

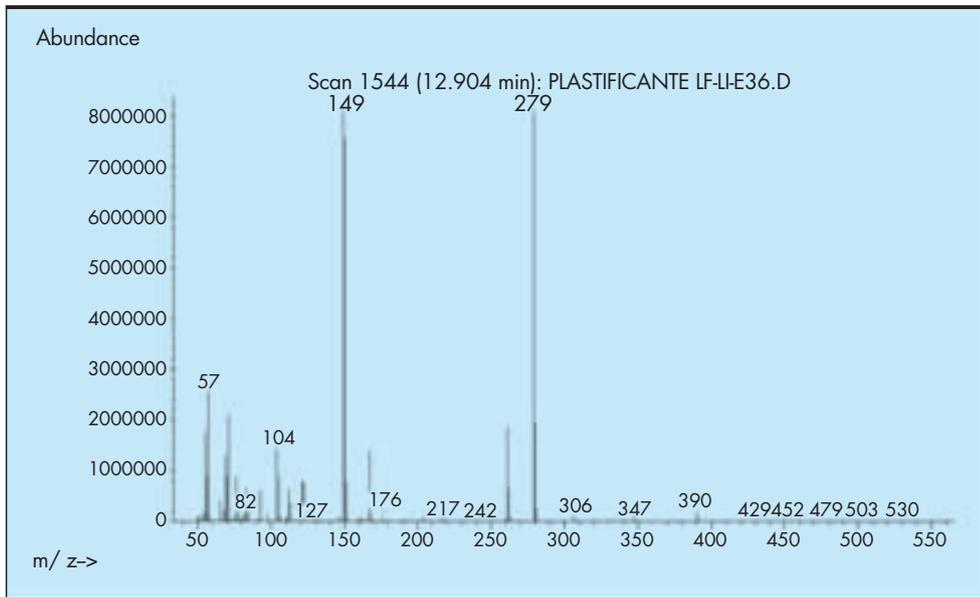


FIGURA 8. Espectro de masas del ftalato de diisodecilo, plastificante procedente de la geomembrana de La Laguna de Barlovento.

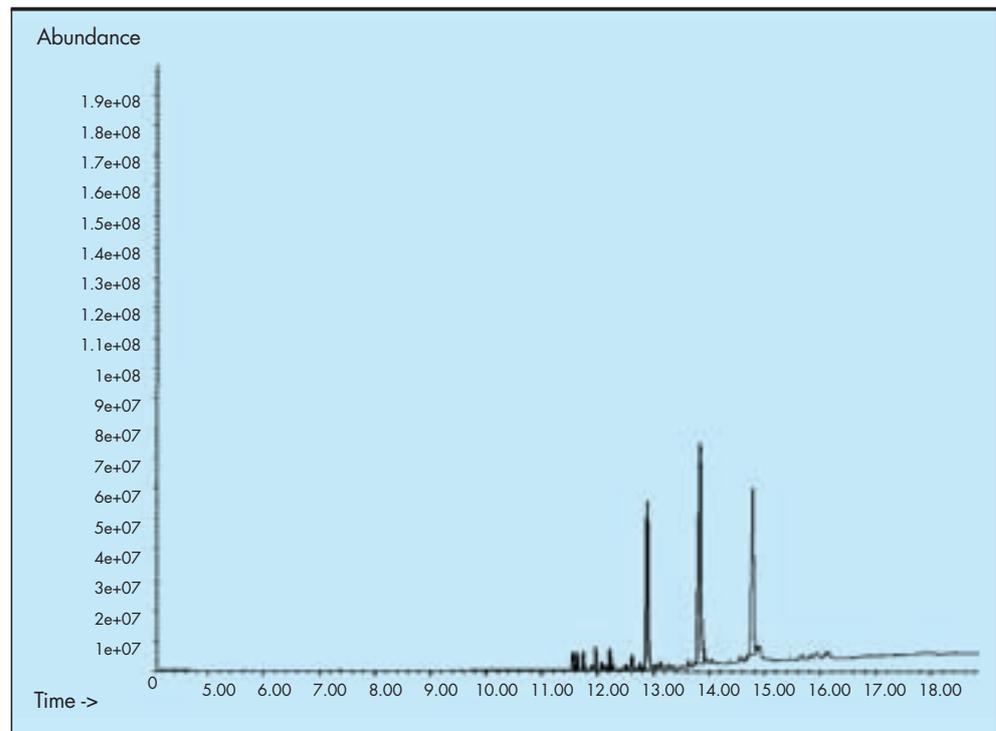


FIGURA 9. Cromatograma de los plastificantes extraídos de la geomembrana procedente de la balsa de La Florida.

La mezcla de los tres plastificantes que forman parte de la formulación de la geomembrana de La Florida condujeron a los resultados que se citan a continuación:

El pico que aparece a 12.90 min tiene las fragmentaciones siguientes: MS,  $m/z$ (intensidad relativa): 279 ( $C_{16}O_4H_{23}^+$ , 72), 167( $C_8H_7O_4^+$ , 16), 149 ( $C_8H_5O_3^+$ , 100). Las fragmentaciones son indicativas del ftalato de di-n-octilo (Figura 10).

El pico a 13.85 min muestra las siguientes características: MS,  $m/z$ (intensidad relativa): 307( $C_{18}O_4H_{27}^+$ , 97), 279( $C_{16}H_{23}O_4^+$ , 98), 167( $C_8H_7O_4^+$ , 23), 149 ( $C_8H_7O_3^+$ , 100) cu-

yas fragmentaciones señalan que este éster aromático es el ftalato de n-decil-n-octilo (Figura 11).

El pico generado a 14.81: MS,  $m/z$ (intensidad relativa): 307( $C_{18}O_4H_{27}^+$ , 86), 167( $C_8H_7O_4^+$ , 16), 149( $C_8H_5O_3^+$ , 100). Las fragmentaciones indican que se trata del ftalato de di-n-decilo. (Figura 12).

El peso molecular del ftalato de diisodecilo es 446. Para el cálculo del peso molecular medio de los ésteres procedentes de la geomembrana de La Florida se aplicó la ecuación de Wilson (1995) obteniéndose un valor de 418.84.

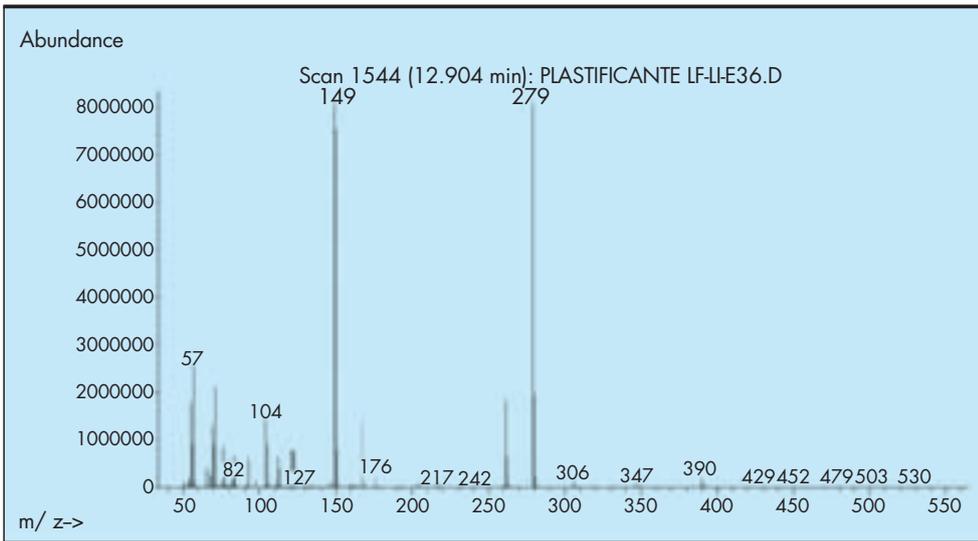


FIGURA 10. Espectro de masas del ftalato de di-n-octilo.

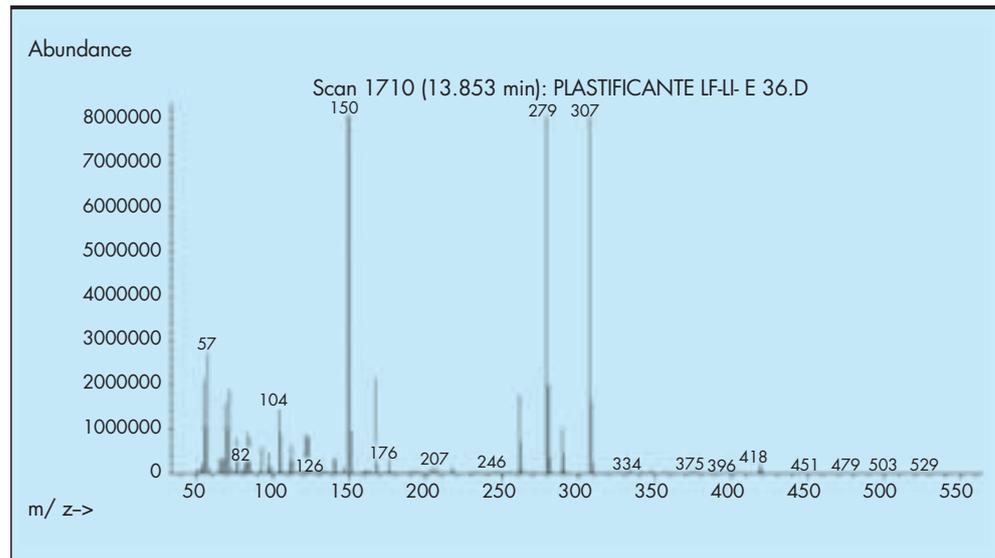


FIGURA 11. Espectro de masas del ftalato de n-decil-n-octilo.

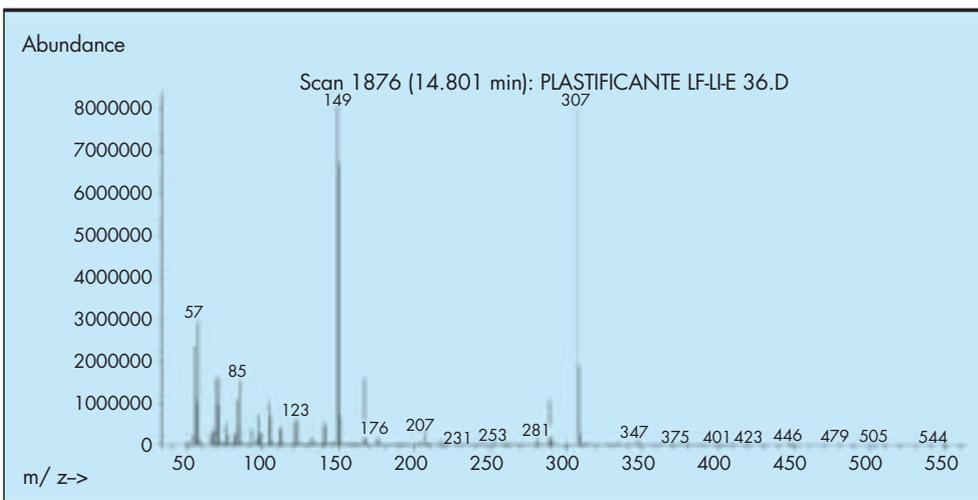


FIGURA 12. Espectro de masas del ftalato de di-n-decilo.

Los resultados alcanzados confirman la gran durabilidad de las dos geomembranas vinílicas ya que utilizan plastificantes de peso molecular igual o superior a 400 (PVC Geomembrane Institute 2004, Stark *et al* 2005). Por otro lado, cuando los radicales alquílicos del éster son ramificados la mayor tendencia a migrar es al aire, cuando son lineales la pérdida más importante es al agua. Esto explica los datos de las tablas anteriores y su posible contradicción.

#### 4. PATOLOGÍA

Generalmente, la bibliografía científica en el campo de la impermeabilización de embalses con materiales sintéticos suele informar de las geomembranas a utilizar en cuanto a naturaleza y a propiedades convencionales, aplicación y, en el mejor de los casos seguimiento. En los foros donde se presentan y debaten estos temas, los distintos técnicos que ocupan las tribunas basan sus disertaciones en comentar los aspectos positivos de los productos considerados, y muy pocas ocasiones, se hace referencia a fallos que con el tiempo se pueden detectar en los diferentes productos, bien por causas debidas a una mala formulación o por propiedades intrínsecas del propio material, como consecuencia del transcurso del tiempo.

Basándonos en la experiencia, se pretende comentar algunos de los casos más frecuentes que nos encontramos al efectuar el seguimiento de estos materiales instalados y que, a modo de guía, sirva para que el técnico responsable o el usuario del embalse tenga en cuenta estos hechos y esté alerta cuando los detecte (Blanco *et al.* 2000, 2002, Aguiar *et al.* 2001).

Como consecuencia del seguimiento en obra de los materiales sintéticos utilizados en la impermeabilización de embalses se ha detectado una gran cantidad de patologías que en lo posible se ha tratado de poner de manifiesto mediante los informes correspondientes a las instituciones responsables y a través de publicaciones y eventos para la prevención por parte de la comunidad científica.

En todos estos materiales los daños observados pueden provenir de las siguientes etiologías:

- Composición o formulación de la lámina.
- Instalación de la geomembrana.
- Ubicación del embalse.
- Flora y fauna.
- Otros factores.

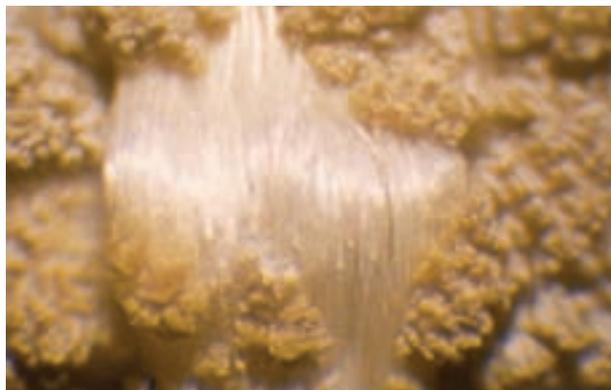


FIGURA 13. Observación por microscopía óptica de una lámina de PVC-P con el textil al descubierto.

#### 4.1. COMPOSICIÓN

Indudablemente la correcta composición o formulación de una membrana, empleando la resina adecuada y los aditivos de calidad suficiente son el factor primordial para un éxito de la impermeabilización. El envejecimiento de la resina como todo material orgánico es un hecho inevitable, pero si debe retardarse en lo posible gracias al empleo de los diversos aditivos.

Cronológicamente, en España después de elaborar una normativa de producto y una década más tarde confeccionar normas de puesta en obra, donde sin interferir con el ingeniero que proyecta la obra, se dan las pautas principales y recomendaciones para el éxito de la impermeabilización del embalse.

Teniendo en cuenta el hecho precedente de que el cumplimiento de la norma del material original a nivel de laboratorio y que tenga la marca de calidad no implica el éxito en la impermeabilización de la pantalla impermeabilizante, se considera en estas normas de puesta en obra el llevar un seguimiento del material con el paso del tiempo para ver su evolución y saber cuando se debe proceder a la reimpermeabilización o a la protección de la membrana.

En las Figuras 13 y 14, se presenta, respectivamente, el aspecto observado por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido de una lámina de PVC-P donde la resina ya ha sido atacada por las radiaciones UV y deja al descubierto las fibras del textil de refuerzo.

#### 4.2. INSTALACIÓN

El soporte base de la impermeabilización jugará un papel importante en la vida de la geomembrana; dependiendo de los cuidados que de antemano se lleven a cabo de él, la lámina tendrá una vida sana por hablar en términos médicos, más prolongada. Los soportes serán el propio terreno que conforma el vaso, hormigón poroso, hormigón resistente, geotextiles u otra lámina, cuando se trata de una doble impermeabilización o una reimpermeabilización. En este último caso, la lámina puede ser de la misma naturaleza o de distinta composición, siempre que los materiales sean compatibles; de cualquier manera, sólo la lámina externa ejercerá la misión de impermeabilizar, la del interior servirá de lecho a la externa y se pondrán los cuidados necesarios para evitar bolsas de agua o gases que podrían llegar a dañar a la geomembrana impermeabilizante, propiamente dicha.

El caso más habitual es que el soporte sea el terreno, por lo cual se ha de poner empeño en eliminar todo tipo de guijarros, cantos, restos de vegetación o cualquier otro elemento



FIGURA 14. Observación por microscopía electrónica de barrido de una lámina de PVC-P donde se aprecia la trama y la urdimbre del textil de refuerzo.

que pueda originar daños en la membrana. Además, se realizará una buena compactación que pueda garantizar el éxito de la obra y la no existencia de fallos de esta etilogía.

La eliminación de restos de materia orgánica es imprescindible, así como la utilización de herbicidas que eviten el crecimiento de vegetación que pueda originar punzonamientos en el material macromolecular; asimismo, habrá que tener en cuenta la eliminación de los gases procedentes de la descomposición de las materias orgánicas citadas que podrían perjudicar gravemente a la impermeabilización.

Los trabajos de transporte, desenrollado e instalación pueden conllevar punzonamientos, desgarros y otros efectos patológicos que, en ocasiones, por ser tan pequeños no se detectan y podrían plantear problemas a posteriori. El empleo de maquinaria de todo tipo durante las obras es el punto de partida de otros fallos detectados. La caída de martillos y otros utensilios pueden originar punzonamientos, fundamentalmente en láminas de poco espesor y máxime si son homogéneas. Aceites de las propias máquinas o disolventes originan puntos débiles, en algunos casos de forma inmediata y en otros con el tiempo, lo cual acortaría bastante la vida de la lámina.

La unión de la lámina a otras obras de fábrica, anclajes, tuberías y otros elementos singulares deben tenerse muy presente y se seguirán siempre las indicaciones del proyecto o del Ingeniero responsable para evitar disgustos innecesarios.

Generalmente, las láminas llegan a la zona de obras en forma de rollos o bien en forma de sábanas prefabricadas, constituidas por una serie de láminas unidas previamente en fábrica. El proceso de soldadura es uno de los puntos clave para culminar con éxito la obra; los materiales de partida pueden ser de unas características inmejorables, pero si la unión entre paños falla, la obra está condenada al fracaso. Las uniones hechas en fábrica son fácilmente controlables y, es de suponer, que se han realizado en unas condiciones adecuadas de limpieza, humedad y temperatura. Sin embargo, en las uniones hechas en obra los parámetros ambientales pueden variar de un día a otro e, incluso, a lo largo de la jornada de trabajo, por lo que la calidad y resistencia de la soldadura no será la misma. Por otra parte, el polvo que acompaña a toda obra es un enemigo crónico de los procesos de unión, por lo que es obligatorio una limpieza profunda de las zonas a soldar. En el caso del poli (cloruro de vinilo) plastificado, las uniones en obra se suelen efectuar con un disolvente, del tipo tetrahidrofurano o ciclohexanona, o bien mediante aire caliente, siendo esta última técnica la de uso más común.

Tanto si la soldadura se realiza mediante disolventes como si se lleva a cabo por vía térmica las zonas próximas a las uniones quedan más o menos debilitadas y es un hecho a tener en cuenta a la hora del seguimiento de la impermeabilización. Dentro del tema de patologías derivadas del proceso de unión entre láminas, cabría indicar que es necesario llevar a cabo una inspección minuciosa antes de proceder al llenado del embalse.

El fenómeno de la retracción en termoplásticos es muy importante y ha causado problemas graves en los casos en que no se ha tenido en cuenta.

No es tan infrecuente como cabría esperar que en una obra se observe distinta coloración entre los paños que constituyen su impermeabilización, que a medida que se va evaluando su comportamiento mediante el seguimiento adecuado, se comprueba que sus características también difieren. En las visitas al embalse se puede constatar; asimismo, como uno de los paños presenta más rigidez que el otro; como uno de ellos tiene tendencia a la adherencia de polvo en su superficie, quizás por su mayor pérdida de plastificante, etc. En principio, el problema se explica por dos causas diferentes. Una de ellas es que los rollos de material que llegaron a obra, aun cuando

procedan de la misma casa comercial, se trata de láminas de dos producciones distintas, con tonalidades diferenciadas, otra de las explicaciones hace referencia a una mala instalación y de colocar hacia el exterior la cara interna, de ahí ese comportamiento tan distinto en el tiempo (Figura 15).

Hay que tener cuidado a la hora de asfaltar el camino de coronación de la balsa, pues por efecto del viento se pueden producir salpicaduras sobre la lámina y impermeabilizante y causar gran cantidad de perforaciones.

#### 4.3. UBICACIÓN

La zona donde está situado un embalse es un factor a tener en cuenta a la hora de analizar los supuestos problemas que pueden presentarse en una geomembrana impermeabilizante. Su entorno, tanto geológico-geotécnico como geográfico es para no echarlo en saco roto. Por un lado, los posibles asientos del conjunto y asientos diferenciales, formación de cavidades, desgastes por erosión interna, eventuales subidas de capa freática; por tanto, las consideraciones propias de la climatología del lugar. Todos estos puntos son citados por la normativa vigente.

Los asientos del soporte de carácter absoluto no suelen tener excesiva importancia, pero si los de tipo diferencial, que pueden conducir a desperfectos considerables. La arruga está presente, la formación de fuelles o pliegues de la lámina puede ser suficiente para evitar el fenómeno, ya que permiten a la adaptación a la nueva geometría.

La temperatura es un elemento a tener presente, ya que su influencia es patente desde el lugar donde están almacenadas las láminas hasta su comportamiento una vez instaladas, pasando por la puesta en obra que por tratarse de un material termoplástico, su influencia es bastante notable. Las retracciones, la soldadura, la pérdida de plastificantes, la carga, el impacto dinámico son propiedades que derivan de los valores y de los cambios que experimenta en el entorno del embalse. Bajas temperaturas pueden dar lugar a la formación de hielos, con el consiguiente riesgo de perforaciones y desgarros provocados, respectivamente, por la flotación y el cambio de nivel bajo la capa helada.

No hay que olvidar el riesgo de lluvias en regiones con abundancia de embalses. Aparte de los problemas de rebosamiento de agua, en ciertos casos donde no se han tomado las medidas necesarias, hay que pensar en su acción en los taludes, fundamentalmente en la erosión o lavado de su parte externa.

El granizo es un fenómeno meteorológico que afecta a nuestros embalses y, a decir verdad, ha llevado consigo bastantes problemas económicos y jurídicos. En general, el daño causado por el efecto del granizo, es una grieta en forma de "pata de gallo" que suele comenzar a formarse de parte interna a externa de la geomembrana.

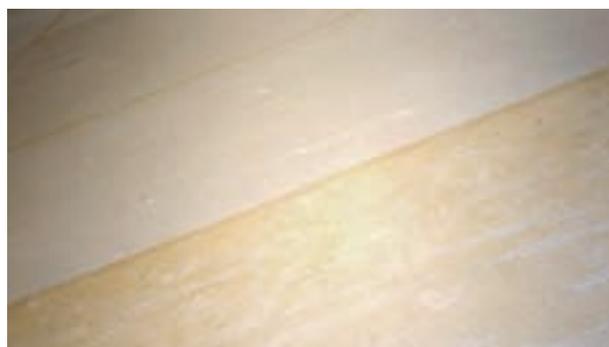


FIGURA 15. Unión de geomembranas de PVC-P en obra, donde se aprecia el distinto tono de color de los dos paños.

El viento es otro de los agentes atmosféricos que incide directamente en la durabilidad de una geomembrana. Una reducción en la separación de anclajes o el empleo de láminas reforzadas que mejoren el módulo de elasticidad pueden reducir el efecto citado. Aparte de la acción sobre los anclajes, no hay que olvidar sus efectos secundarios provocando desgarros y llegando a influir, muy negativamente, sobre zonas de soldadura que deben ser protegidas. Además de las soluciones mencionadas anteriormente, para evitar la rotura de la lámina por este hecho se puede hacer uso de lastrados o durmientes que atenúen el fenómeno.

El viento puede generar olas que deformen los taludes formando un escalón en el nivel del plano del agua, lo cual puede suponer la rotura de la geomembrana. En ocasiones se producen desplazamientos del material hacia el pie del embalse o hacia los anclajes intermedios dando lugar a embolsamientos y tensiones en la pantalla impermeable. Se ha constatado, además que el mencionado oleaje favorece la pérdida de plastificante. Los embalses de San Antonio y Valle Molina, en el norte de la Isla de Tenerife, son dos ejemplos claros donde este fenómeno se presenta con cierta frecuencia; en la figura se muestra el oleaje en el segundo de los embalses citados.

Por último y antes de acabar este epígrafe relacionado con la ubicación del embalse, hay que hacer referencia a las aguas que almacene en cuanto a su calidad y contaminación, cuyo efecto sobre la pantalla impermeable va a depender de los productos contaminantes arrastrados y de su concentración. La proximidad de gasolineras, aeropuertos y complejos industriales que originen sustancias químicas, que ya sea por filtración en el terreno o en el agua que llegue al embalse, es un factor a estudiar y a tener en cuenta.

#### 4.4. FLORA Y FAUNA

Se ha referido anteriormente a la aplicación de herbicidas en la zona donde se va a instalar la membrana impermeabilizante y los distintos efectos provocados por la vegetación que podría quedar en el vaso del embalse. Aquí tenemos que hacer mención a la posible vegetación que surge, no obstante en sus proximidades. Hay vegetales que crecen en terrenos muy áridos y que de forma rápida transforman su tallo herbáceo en leñoso con abundancia de raíces y que muchas veces son capaces de levantar la capa asfáltica del camino de coronación y llegar a la zona impermeabilizada con el consiguiente riesgo. Dichas plantas son comunes en las Islas Canarias y en las zonas de Alicante y Murcia, cuyo nombre científico es “*Nicotiana glauca*” (Figura 16).

Tampoco es difícil encontrar las zarzas de bastante grosor y abundancia de espinas proliferan por encima de alguna geomembrana, con el consiguiente peligro de daño que conlleva.



FIGURA 16. “*Nicotiana glauca*” en contacto con una geomembrana.

Aunque las geomembranas no constituyen un alimento para las alimañas en general ni para los roedores en particular, no es raro que estos se esfuercen en abrirse paso a su través para asegurar su supervivencia. Es muy común que en determinados animales busquen en el embalse el lugar donde colmar su sed y, de esta forma, hemos detectado la presencia de perros, gatos, zorros y jabalís en los embalses en los que realizamos el seguimiento. Los animales domésticos, con cierta frecuencia, los hemos visto muertos por no poder salir de la balsa; huellas más o menos importantes de jabalís y láminas dañadas en distintas partes por el ataque de zorros; en este último caso, se ha llegado a detectar el geotextil del soporte al descubierto. Los roedores tiene cierta apetencia por las láminas de poli (cloruro de vinilo) plastificado, hecho que se ha atribuido a la presencia de plastificantes y a su olor y sabor característicos, que puede incitar el acercamiento de estos animales; por ello, en láminas homogéneas sí se conocen casos, aunque muy aislados de perforación; lo que si parece probado es que en las láminas que llevan una inserción de fibra de vidrio son menos atacadas por los roedores como consecuencia de la presencia de esta fibra inorgánica.

Para evitar daños en la pantalla impermeabilizante por la presencia de alimañas, se debe vallar convenientemente el embalse y, además, en su parte baja debe llevar un murete de hormigón para evitar que puedan horadar la tierra y puedan pasar por debajo del vallado.

Aparte de los “animales a ras de suelo”, no hay que olvidar la gran cantidad de aves que suelen abreviar en los embalses; esas auténticas manadas viven durante mucho tiempo sobre la membrana del embalse y además de picotear en ella, dejan allí sus excrementos. Sin embargo, no se han detectado perforaciones como consecuencia de picotazos, ni tampoco acción negativa de los excrementos de las aves.

El ataque por microorganismos es una patología que hay que tener presente. Inicialmente, se suele someter a la lámina a un ensayo de resistencia a los microorganismos que deben superar, según se señala en la correspondiente normativa vigente. Como es sabido, la materia orgánica vegetal o animal es susceptible de ser atacada por este tipo de seres vivos micromoleculares cuya acción se ve favorecida por la presencia de humedad, a la que no es ajena, evidentemente la geomembrana de un embalse; por tanto, las pantallas impermeabilizantes son susceptibles de este ataque.

#### 4.5. OTROS FACTORES

Serian tantos los elementos que pueden originar fallos en una geomembrana que resultaría complejo, el mencionarlos. Aquí se plasman los que han sufrido con más frecuencia y que todavía no se han echado en olvido.

Los problemas por fuego, afortunadamente hasta el momento no han tenido lugar con profusión en nuestro país, pero tampoco hay que olvidarse de ellos, ya que la “pertinaz sequía” de algunos puntos donde se hallan ubicados los embalses, quema de rastrojos, proximidad a poblaciones, etc., puede conducir a fuego sobre la geomembrana, muchas veces llevados por el viento. Los caminos de coronación, la vegetación de taludes exteriores y el vallado del conjunto del embalse influyen en que el fuego no afecte a la geomembrana.

El desprendimiento de piedras, guijarros, cantos rodados, procedentes de las proximidades de los embalses causa frecuentemente perforaciones en la lámina, por lo que se recomienda la protección de estas zonas anejas al embalse con una malla adecuada o bien por otro procedimiento que impida este hecho. Más problemático e inusual es el hundimiento de una parte de talud próximo al embalse que puede llevar consigo una reparación casi total de la obra. La consolidación de los terrenos adyacentes es algo a tener en cuenta.

El inevitable e imprescindible vandalismo se manifiesta de formas tan variables que es complicado agrupar, cuantificar y citar alguna. La opción es tan variada que va desde arrojar objetos (piedras, madera, neumáticos) del exterior de la valla de cerramiento hasta forzar los accesos al embalse y arrojar vehículos robados. Pero uno de los hechos más comunes es el empleo del embalse como piscina de agua dulce, con la dificultad que supone la salida de los nadadores. Otro deporte que conlleva el deterioro de la membrana es el patinaje sobre piedras a lo largo de los taludes.

La caza y la pesca no son ajenas a los posibles daños en las geomembranas. Es común, observar en la lámina pequeños agujeros o punzonamientos que suelen coincidir con la zona de abundancia de cartuchos. En algunos embalses existen peces, unos procedentes del agua de aportación del embalse, otros colocados allí con algún fin. El crecimiento en número y peso de los mismos los hace muy atractivos al pescador que no deja de saltar la valla y echar la caña al embalse y varios peces al morral. Lo que no se da cuenta el osado pescador es que la acción de su anzuelo ha originado unos deterioros en la lámina de cierta entidad, si dichos deterioros son difíciles de localizar ya que están cubiertos por el agua, más difícil aún resulta al técnico conocer su etiología.

## 5. COMENTARIOS

La totalidad de las geomembranas instaladas han cumplido los requerimientos mínimos exigidos a una lámina, inicialmente, para su empleo en obras hidráulicas. No obstante, ha que tener en cuenta que todo material orgánico macromolecular sufre un proceso de envejecimiento con el tiempo que será mayor o menor dependiendo de las condiciones adversas de su lugar de instalación, fundamentalmente, de la incidencia de las radiaciones solares.

La experiencia española adquirida durante más de dos décadas de evolución, en obra, de las barreras geosintéticas permite resaltar lo siguiente:

1. Las geomembranas reforzadas con tejidos de hilos sintéticos (PVC-P, CSM, PP) presentan unos valores de resistencia a la tracción y el alargamiento que son función del textil de la armadura, por ello sus variaciones en el tiempo no son significativas ya que los hilos están protegidos por la resina que evita su exposición a las radiaciones solares. Sin embargo, cuando la resina empieza a degradarse y el citado textil aparece al descubierto el ataque por los rayos UV al poliéster es rápido y el resultado es que tanto la carga como la elongación bajan de una manera notable. En todas las láminas homogéneas, el alargamiento en rotura disminuye a lo largo del tiempo, siendo esta disminución importante en el caso de los cauchos.
2. La prueba de doblado a bajas temperaturas, donde las muestras de la geomembrana permanecen 5 h en una cámara frigorífica a una determinada temperatura, según la naturaleza del material macromolecular, y posteriormente procederse a una flexión de 180° durante un tiempo de 3 s es un dato importante para conocer el estado de la lámina en un determinado momento, siendo de especial relevancia para el PVC-P. En esta característica los materiales de mejor comportamiento son los polietilenos y polipropilenos; en el extremo opuesto se encuentran los poli(cloruros de vinilo) plastificados.
3. La prueba de resistencia mecánica a la percusión consiste en lanzar el percutor de 0.5 kg con extremo en forma de semiesfera de 12.7 mm de diámetro, desde una altura de 500 mm y comprobar tras la realización

de una prueba de estanquidad que el material no sufre perforación en la zona de impacto. En los cauchos, esa altura es menor, 350 mm, aunque con el tiempo y como consecuencia de su total vulcanización es capaz de superar, también, el valor de 500 mm. Por tanto, desde este punto de vista del impacto dinámico se puede decir que el peor comportamiento lo tienen los cauchos y los mejores, los polietilenos de alta densidad.

4. El mejor comportamiento al punzonamiento corresponde al polietileno de muy baja densidad, así como, también, al copolímero de etileno-acetato de vinilo, los cauchos, polipropileno y las poliolefinas. En el polo opuesto, situaríamos a los polietilenos de alta densidad, poli(cloruro de vinilo) plastificado reforzado con tejido de hilos sintéticos y al polietileno clorosulfonado. Asimismo, se comportan mejor los materiales homogéneos que los reforzados.
5. La resistencia al desgarro realizada sobre las barreras geosintéticas poliméricas de polietileno no ha experimentando una variación apreciable con el tiempo. Entre los polietilenos, la resistencia al desgarro es superior en el de alta densidad.
6. Las fotografías obtenidas en el ensayo para determinar la dispersión del negro de humo indican que esa dispersión es correcta en todos los casos, pues se les asignó un inferior a 3 en la escala 1-7, donde cuanto más bajo sea ese guarismo, mejor es la dispersión del aditivo.
7. Al llevar a cabo la resistencia de la soldadura por tracción, la totalidad de las probetas rompen en las proximidades o en el borde de la unión, pero fuera de la soldadura propiamente dicha. Cuando se desea tener datos cuantitativos del estado de la unión entre paños y, si la junta lo permite por sus dimensiones, se realizó la prueba por el procedimiento de pelado. Los valores más altos corresponden a los polietilenos de alta densidad y los más bajos a los cauchos.
8. La microscopia óptica de reflexión y la microscopia electrónica de barrido permiten conocer más a fondo el estado de las geomembranas en un determinado momento. Sin embargo, su análisis debe llevarse a cabo con bastante cuidado pues podría ocurrir detectar fallos donde realmente solo aparecen estrías de contacto con el soporte o de manipulación de la lámina, ya sea durante la toma de muestras o durante el transporte. Es común en ciertas geomembranas homogéneas de caucho la presencia de huellas del tejido utilizado en el proceso de vulcanización que no debe confundirse con el tejido sintético de una lámina reforzada.
9. El poli(cloruro de vinilo) es un material rígido que para su utilización como barrera geosintética polimérica (GBR-P) debe ser transformado en flexible. Lo habitual, es realizar ese proceso por plastificación externa, es decir añadiendo unos aditivos llamados plastificantes, generalmente, son ésteres de elevado peso molecular. El problema de este tipo de geomembrana es que va perdiendo estos productos con el tiempo y por ello la lámina se va haciendo más rígida y sufre una notable degradación. Si se desea una gran durabilidad en este material hay recurrir a la incorporación de plastificantes de pesos moleculares superiores a 400. Considerando que la mayor tendencia de pérdida de los ftalatos de radicales alquílicos lineales es al agua y de los ésteres de radicales ramificados es al aire, sería recomendable la utilización de un sistema de dos plastificantes, uno con radicales alquilo lineales y otro con ramificados.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, E., Armendáriz, V. Blanco, M., Leiro, A., Vara, T. y Zaragoza, G. 2001. Patología de pantallas impermeabilizantes de embalses constituidas por geomembranas de poli(cloruro de vinilo) plastificado. *Proc. VI Cong. Patol. Const.*, Santo Domingo (República Dominicana).
- Aguiar, E. y Blanco, M. 1995. Experience in connection with the performance of plasticized polyvinyl chloride sheeting in Tenerife basin sealing. *Proc. Research and Develop. Field Dams*, 361-375. Crans-Montana (Suiza).
- Aguiar, E., Blanco, M., Romero, A., Sacristán, A., Soriano, J. y Vara, T. 2002. Efectos de la orientación en la degradación del poli(cloruro de vinilo) plastificado utilizado como geomembrana sintética en la impermeabilización del embalse de la Cruz Santa. *Aislamiento e impermeabilización*, 24, 14-21.
- Aguiar, E., Blanco, M., Soriano, J. y Vara, T. 2003. Influencia de la orientación en la degradación del poli(cloruro de vinilo) plastificado utilizado como geomembrana sintética en la impermeabilización del embalse de La Tabona. *Ing. Civil*, 130, 95-103.
- Aguiar, E., Blanco, M., Vara, T., Armendáriz, V. y Soriano, J. 2008. Evolución de las geomembranas sintéticas instaladas en el campo experimental de El Saltadero con vistas a su empleo en la impermeabilización de Obras Hidráulicas. *Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*. 477-488. Palma de Mallorca.
- Amigó, E. y Aguiar, E. 1994. Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas. *Consejería de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Canarias*.
- Blanco, M. 2005. Geomembranas I. *Proc. I Simposio Internacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas*. Vol. I. Sevilla.
- Blanco, M. 2009. Experiencia española en el empleo de geomembranas en la impermeabilización de balsas. *Proc. III Seminario Portugués sobre geosintéticos*. Coimbra (Portugal).
- Blanco, M. y Aguiar, E. 1998. Geomembranas sintéticas a base de polietileno de alta densidad utilizadas en la impermeabilización de embalses. Seguimiento de obras en las islas Canarias. *Ing. Civil*, 109, 49-59.
- Blanco, M., Aguiar, E., García, F., Vara, T., Soriano, J. y Castillo, F. 2011. État de la barrière géosynthétique polymérique en EPDM de la retenue d'El Golfo dans l'île d'El Hierro (Îles Canaries). *Proc. 8<sup>mes</sup> Rencontres Géosynthétiques*, 283-293. Tours (Francia).
- Blanco, M., Aguiar, E. y Zaragoza, G. 2002. Patología de geomembranas sintéticas instaladas como pantallas impermeabilizantes en embalses. *Dam Maintenance and Rehabilitation I, Llanos et al. (eds.) Editorial Balkema*, pp. 957-964. Rotterdam.
- Blanco, M., Castillo, F., García, F. y Soriano, J. 2010a. Las geomembranas sintéticas en la rehabilitación y mantenimiento de paramentos de presas. *Dam Maintenance and Rehabilitation II. Romeo et al. (eds.) Taylor & Francis Group*, pp. 335-341. London.
- Blanco, M., Cuevas, A. y Aguiar, E. 2002. Patología de geomembranas de poli(cloruro de vinilo) plastificado instaladas como pantallas impermeabilizantes en embalses. *Ing. Civil*, 119, 91-101.
- Blanco, M., Cuevas, A., Castillo, F. y Aguiar, E. 1996. Puesta a punto de una nueva metodología experimental para la determinación de la resistencia a la perforación de geomembranas sintéticas. *Ing. Civil*, 103, 65-69.
- Blanco, M., Soriano, J., Aguiar, E. y Zaragoza, G. 2002. Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses. *Ing. Civil*, 127, 51-59.
- Blanco, M., García, F., Cea, J.C. de y Sánchez, F. J. 2.008a. Control en obra de la impermeabilización con geomembranas sintéticas. *Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*. 319-328. Palma de Mallorca.
- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Castillo, F. y Aguiar, E. 2008b. Estudio de plastificantes utilizados en geomembranas de PVC-P empleadas en impermeabilización de obras hidráulicas. *Rev. Plast. Modernos*. 96 (629), 386-391.
- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Aguiar, E. y Castillo, F. 2009. Determinación de los ftalatos utilizados como aditivos en la geomembrana de la balsa de La Florida mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas. *Ing. Civil*, 154, 87-95.
- Blanco, M., Castillo, F., García, F. y Soriano, J. 2010a. Las geomembranas sintéticas en la rehabilitación y mantenimiento de paramentos de presas. *Dam Maintenance and Rehabilitation II. Romeo et al. (eds.) Taylor & Francis Group*, pp. 335-341. London.
- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Aguiar, E., Castillo, F. y Crespo, M. A. 2010b. Influencia del tipo de plastificante en la durabilidad de las geomembranas de PVC-P. *Proc. 3º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3º Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*. 347-357. Barcelona.
- Blanco, M. y Zaragoza, G. 2003. El Odiel-Perejil como un caso pionero en la utilización de una geomembrana sintética en la impermeabilización de presas. *Ing. Civil*, 132, 33-40.
- Cea, J.C. de, Asanza, E. y Blanco, M. 2003. Face Protection: Geomembranes Lining vs. Paint Coating. *Proc. 21 Congreso Internacional de Grandes Presas*. Montreal.
- Crespo, M. A. 2011. Comportamiento de barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P) a base de poli(cloruro de vinilo) plastificado de distinta formulación, instaladas en embalses. *Tesis Doctoral*. Universidad Complutense de Madrid.
- Fayoux, D. 2004. La impermeabilización del embalse de la Laguna de Barlovento. *Proc. Jornadas sobre impermeabilización con materiales sintéticos*. La Palma (España).
- International Commission on Large Dams. 1991. Watertight Geomembranes for Dams. State of the Art. *Bulletin ICOLD N° 78* Paris.
- Krauskopf, L. G. 1993. Plasticizer structure/performance relationships. *Journal of Vinyl Technology* 15, N° 3, 140-147.
- Leiro, A., Blanco, M. y Zaragoza, G. 2002. Performance of synthetic geomembranes used in waterproofing of spanish reservoirs. *Geosynthetics 7<sup>th</sup> ICG, Delmas, Gourc & Girard (Eds.) Editorial Balkema*. 979-982. Rotterdam.
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino 2010. Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas. Madrid.
- Navarro, A., Blanco, M. y Rico, G. 1989. Materiales Ópticos Orgánicos. *Ed. AAEEO*, Madrid.
- PVC Geomembrane Institute (PGI). 2004. PVC Geomembrane Material Specification 1104. *University of Illinois*, Urbana, IL.
- Soriano, J., Blanco, M., Aguiar, E. y Burgos, J. 2010. La microscopía como método de análisis en el estudio de geomembranas sintéticas de PVC-P. *Proc. 3º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3º Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*, 411-422. Barcelona.
- Stark, T. D.; Choi, H. y Diebel, P. W. 2005. Influence of plasticizer molecular weight on plasticizer retention in PVC geomembranes. *Geosynthetics International* 12, N° 2, 99-110.
- UNE-EN 13 361:2005. Barreras geosintéticas. Características para su utilización en la construcción de embalses y presas.
- UNE 104 306:2000. Materiales sintéticos. Determinación del contenido en plastificantes en láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado, PVC-P, utilizadas en impermeabilización.
- UNE 104 317:2012. Materiales sintéticos. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas.
- Wilson, A. S. 1995. Plasticizers: Principles and Practice. *Institute of Materials*. London.

LAS CARRETERAS HECHAS  
CON BETUNES **ELASTER** AÚN ESTARÁN AHÍ  
CUANDO YA NO SEAN NECESARIAS.



PROAS PRESENTA **ELASTER**, SU NUEVA GAMA DE  
BETUNES MODIFICADOS CON POLÍMERO.

Tecnología punta aplicada al Betún para que tus carreteras  
sean más seguras, ecológicas y longevas.

[www.proas.es](http://www.proas.es)

**PROAS**

Innovando para ti

# LÍDER EN SOLUCIONES GEOSINTÉTICAS

## DRENAJE

### INTERDRAIN



- » MINERÍA
- » VERTEDEROS (VASOS NUEVOS Y SELLADOS)
- » CANALES
- » OBRAS LINEALES

### TECHDRAIN



## CONTROL DE LA EROSIÓN

### TRINTER



- » OBRAS LINEALES
- » CANALES
- » MINAS
- » VERTEDEROS
- » CAMPOS DE GOLF
- » ÁREAS RESIDENCIALES
- » JARDINES
- » BALSAS

### TRINTER R

