

Refuerzo de bases de la plataforma provisional para la ejecución de pantalla de pilotes en el embalse de Flix (Tarragona)

PATRICIA AMO SANZ (*), IGNACIO DIEGO PEREDA (**) y JAVIER SANTALLA PRIETO (***)

RESUMEN Las obras de descontaminación del embalse de Flix tienen por objeto la eliminación de los residuos acumulados en el lecho del río Ebro, producto del vertido histórico de contaminantes por parte de un complejo químico situado en su margen derecha. El embalse de Flix retiene actualmente en su vaso unos centenares de miles de metros cúbicos de lodos procedentes de la fracción sólida de los vertidos del complejo antes citado que se asienta en su margen derecha (es preciso considerar también un volumen no despreciable de sustrato aluvial potencialmente afectado por la contaminación proveniente de los lodos). Estos lodos son elementos residuales de sus fabricantes y están constituidos por compuestos químicos contaminantes mezclados con otros de carácter inerte. Los contaminantes pertenecen a tres grupos principales: organoclorados, metales pesados (principalmente mercurio) y radionucleidos. Están en concentraciones elevadas, susceptibles de transmitir su contaminación a los sedimentos y subsuelo del embalse y al agua circulante por el río. En el caso del agua, esa transmisión se produce de hecho, y existe un registro de episodios puntuales en los que se han sobrepasado los límites de tolerancia de contenido de componentes agresivos en el ecosistema.

BASE REINFORCEMENT OF THE PROVISIONAL PLATFORM FOR THE CONSTRUCTION OF PILES SCREEN ON THE FLIX RESERVOIR (TARRAGONA)

ABSTRACT Decontamination works on Flix reservoir aimed at the removal of accumulated debris in the bed of the river Ebro, as result of historical discharge of pollutants by a chemical complex located there. The Flix reservoir currently retains in his base a lot of cubic meters of sludge from the solid fraction of the discharge of the aforementioned complex that sits on the right bank (a non-negligible volume of alluvial substrate potentially affected by pollution from the sludge must be considered). The contaminants belong to three main groups: organochlorines, heavy metals (particularly mercury) and radionuclides. They are in high concentrations, capable of transmitting contamination to the sediments and basement of the reservoir and the water flowing through the river. In the case of water, that transmission occurs in fact, and there is a register of episodes that have exceeded the limits of tolerance of aggressive components contained in the ecosystem.

Palabras clave: Nivel freático, Fluencia, Descontaminación, Capacidad portante, Factor de seguridad.

Keywords: Water level, Creep, Decontamination, Bearing capacity, Safety factor.

1. ANTECEDENTES

La fábrica de Flix inició su actividad en 1900 con la producción de cloro y sosa. A partir de 1949 se introduce el uso de mercurio durante el proceso productivo. Hasta la introducción

en la década de los 80 de leyes y mecanismos para limitar cuantitativa y cualitativamente la generación de residuos, los vertidos al cauce del río eran generalizados.

En el año 1949 se construye un embalse aguas abajo de la fábrica, afectando significativamente la dinámica fluvial del río y contribuyendo a la acumulación de residuos contaminantes en el margen del río.

Tras diversos estudios que ponen de manifiesto la existencia de una contaminación histórica derivada de la actividad industrial, y en consideración del riesgo que una posible movilización de esta podría suponer, se adjudica en febrero de 2005 la redacción de un proyecto constructivo para la eliminación de los residuos.

(*) Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Técnico Huesker Geosintéticos, Pamplona, España. E-mail: pamo@huesker.es

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director Técnico Huesker Geosintéticos, Pamplona, España. E-mail: idiego@huesker.es

(***) Geólogo. Gerente Huesker Geosintéticos, Pamplona, España. E-mail: jsantalla@huesker.es



FIGURA 1. Vista general de la obra.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto adopta una solución 'ex situ' para la descontaminación del embalse, fundamentada en la extracción de los residuos, el tratamiento de éstos en la medida que sea necesario, y su posterior traslado y confinamiento en depósito controlado.

Las obras a realizar para facilitar la extracción de los residuos y su posterior tratamiento serían:

- Construcción de un muro de doble línea de tablestacas de 1.300m de longitud, cerrando un recinto de trabajo contra la margen derecha del embalse para el aislamiento de corrientes y fluctuaciones fluviales de la superficie a tratar. Por necesidades estructurales y con el fin de conseguir el empotramiento mínimo, el muro se

complementa con una banquetta de pedraplén, a su vez protegido mediante escollera en la cara exterior.

- Construcción de un muro de protección de 1.100m de longitud en la línea litoral de la margen derecha del embalse, materializado en forma de 1.700 pilotes secantes de 1,0m de diámetro y con anclajes provisionales en cabeza durante la fase de extracción de material. Sus funciones son de sostenimiento y prevención de subsidencia de la ladera y de aislamiento hídrico. Su ejecución requiere la construcción previa de un camino paralelo a la fachada de la fábrica que permitieran la entrada de una pilotadora con un peso de 120 ton, sobre unos depósitos aluviales de unos 12 m de espesor, con el nivel freático en la mayoría de las zonas en superficie, de bajísima capacidad portante.



FIGURA 2. Vista aérea de la obra durante la ejecución del muro exterior e interior.



FIGURA 5. Detalle desenrollado del geosintético de refuerzo.



FIGURA 6. Fase I, Ejecución de la plataforma.

En el método de Bishop, la fuerza de tracción soportada por los diferentes geosintéticos se calcula utilizando superficies de deslizamiento circulares. Tras sucesivas iteraciones se busca el círculo de deslizamiento correspondiente al mayor valor de fuerza a tracción.

Además en el diseño del geosintético se establecen las siguientes hipótesis:

- Fluencia correspondiente a su vida útil, 120 años.
- El terreno con el que está en contacto presenta un $D_{90} < 65$ mm.
- El pH del suelo de su alrededor está comprendido entre 4 y 9.
- El factor de extrapolación de datos deberá ser el correspondiente a su vida útil, 120 años.

Estas hipótesis marcarán los coeficientes de minoración a aplicar para la definición de la tensión nominal del geosintético a utilizar.

La instalación de este material es rápida y sencilla. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Regularización de la superficie. Como no se podía contar con la ayuda de maquinaria para realizar esta labor, de manera manual se preparó la superficie para facilitar la colocación del geosintético eliminando y/o tumbando la vegetación existente.
- Cortado del material según las necesidades de paños en la obra. Como ya se ha mencionado una de las capas se colocaba en sentido transversal al avance de la pilotadora y la otra en el longitudinal, bajo la zona de apoyo de la oruga de la máquina pesada.
- Extendido del material y solape de los paños paralelos unos 50 cm.
- Extendido de la capa de cobertura.

3. CONCLUSIONES

De acuerdo con el diseño anterior para conseguir la capacidad portante en la plataforma suficiente para el acceso de la máquina pilotadora y la ejecución de la pantalla de pilotes, es necesario colocar un geosintético de refuerzo uniaxial dispuesto en dirección transversal al río + un geosintético de refuerzo uniaxial dispuesto en la dirección paralela al río a cada lado de la pantalla de pilotes + un espesor de material granular de 50 cms.



FIGURA 7. Fase II, Ejecución de la pantalla.

Datos de interés	
Acta replanteo Flix:	18/01/2010
Plazo previsto de ejecución:	42 meses
Presupuesto de adjudicación:	155.142.049 €
Volumen de m ³ de suelo a descontaminar:	885000 m ³ (1250000 Tn)

El método de ejecución de la plataforma se realizó colocando el material granular de los extremos hacia la zona central, realizándose así por el propio peso, la función de anclaje del material geosintético, evitándose la realización de zanjas de anclaje laterales.

Se replanteó la posición de la pantalla de pilotes a cota 0, nivel del geosintético y en el proceso de creación de la plataforma se dejó la hilada de la pantalla sin rellenar de material granular. Lo cual favorece la instalación de los pilotes y disminuye los daños mecánicos generados en el geosintético durante el proceso de ejecución.



FIGURA 8. Vista aérea de la obra durante la colocación del geotextil de refuerzo.

4. REFERENCIAS

KOERNER. R. M, 1998: «Designing with geosynthetics». Fourth edition. PRENTICE HALL. Upper Saddle River, New Jersey 07458. ISBN: 0-13-726175-6.

BURD H J. & FRYDMAN S, 1997: «Bearing capacity of plane-strain footing on layered soils». Canadian Geotechnical Journal, 34 (2): 241-253.

ANDREW CHARLES.J, CORKE.D, SKINNER.H.D, 2004: «Working platforms for tracked plant» Proceedings of the ICE- Geotechnical Engineering, volume 161, issue 6, 01. Pages 279-281.

SYLLWASSCHY O, 2004: «Design of sludge lagoon cappings» Geotechnical Engineer meeting, volume 2, pages 110-117.

LLAMAS J., 1993: «Hidrología general» Bilbao: Servicio Editorial, Universidad del Pais Vasco. ISBN: 84-7585-435-4.

BOWLES J, 1997: «Foundation analysis and design» McGraw Hill Book Company Limited, England. ISBN: 0-07-006776-7.

SHUKLA, S. K, 2002: «Geosynthetics and their applications» Thomas Telford Ltd. Heron Quay. London E14 4JD. ISBN: 0-7277-3117-3.

Contención Segura
es un concepto único en cualquier lugar...



Desempeño Duradero de Alto Rendimiento

S I N G L E Q U A L I T Y G L O B A L B R A N D L O C A L N E E D S

Proud to be
www.atarfil.com





ATARFIL®
Since 1995 Geomembranes

Estudio comparativo de tres geomembranas de distinta naturaleza (PVC-P, PEAD, EPDM) empleadas en la impermeabilización de balsas

MANUEL BLANCO FERNÁNDEZ (*), FRANCISCA CASTILLO RUBÍ (**), JESÚS SORIANO CARRILLO (***), ANA MARTA NOVAL ARANGO (****), NATHALIE TOUZE-FOLTZ (*****), LINA PARGADA IGLESIAS (*****), GLORIA RICO ARNAIZ (*****), y ESCOLÁSTICO AGUIAR GONZÁLEZ (*****)

RESUMEN Este trabajo trata de poner de manifiesto el comportamiento a lo largo del tiempo de tres geomembranas sintéticas constituidas por poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P), polietileno de alta densidad (PEAD) y caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM), que forman parte del sistema de impermeabilización de las balsas de Los Llanos de Mesa, San Isidro y El Golfo, respectivamente. Se muestran los datos obtenidos en la determinación de las características iniciales de las tres láminas, así como los obtenidos en función del tiempo transcurrido desde su instalación. Se presentan los resultados referentes a espesores, contenido y naturaleza de los plastificantes (en PVC-P), características de tracción, doblado a bajas temperaturas, resistencia al impacto dinámico, resistencia a la perforación, dureza Shore, resistencia al desgarro (en PEAD), contenido y dispersión de negro de humo (en PEAD), resistencia de las soldaduras tanto las realizadas en obra como en fábrica así como la aplicación de técnicas de microscopía óptica de reflexión y electrónica de barrido. De los datos obtenidos se deduce una gran durabilidad de las geomembranas, independientemente de su naturaleza macromolecular. En la determinación de estas características se ha hecho uso de técnicas analíticas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), cromatografía de gases (CG) y espectrometría de masas (EM).

COMPARATIVE STUDY OF THREE DIFFERENT KINDS OF GEOMEMBRANES (PVC-P, HDPE, EPDM) USED IN THE WATERPROOFING OF RESERVOIRS

ABSTRACT This work describes the long-term behaviour of three kinds of geomembranes which are constituted by plasticized poly vinyl chloride (PVC-P), high density polyethylene (HDPE) and terpolymer rubber of ethylene-propylene-dienic monomer (EPDM), used as the waterproofing system of the reservoirs "Los Llanos de Mesa", "San Isidro" and "El Golfo", respectively. Characteristics of the three original geomembranes and their behaviour along time are presented. Thicknesses, content and nature of the plasticizers (in PVC-P), tensile properties, dynamic and static puncture, foldability at low temperature, shore hardness, tear resistance and carbon black (in HDPE), joint strength (shear and peeling test) and microscopy, both optical and electronic scanning tests were carried out. Results obtained conclude with a long-term durability of geomembranes, independently of their macromolecular nature. These characteristics were determined by advanced analytical techniques in PVC-P samples, such as Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Gas Chromatography (GC) and Mass Spectrometry (MS). Spectrometry (MS).

Palabras clave: Geomembrana, Impermeabilización, Balsa, PVC-P, PEAD, EPDM.

Keywords: Geomembrane, Waterproofing, Reservoir, PVC-P, HDPE, EPDM.

(*) 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

(**) Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX), Madrid, España. E-mail: Francisca.Castillo@cedex.es

(***) Coordinador programa Técnico Científico. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX), Madrid, España. E-mail: Jesus.Soriano@cedex.es

(****) Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX), Madrid, España. E-mail: Ana.M.Noval@cedex.es

(*****) Cemagref, Antony, France. E-mail: nathalie.touze@irstea.fr

(*****) Doctora en CC. Químicas. Catedrática en Química Orgánica E.U. Universidad Complutense de Madrid. E-mail: pargada@quim.ucm.es

(*****) Doctora en CC. Químicas. Profesora Titular de Universidad. Departamento de Química Orgánica I. Universidad Complutense de Madrid. E-mail: glori012@ucm.es

(*****) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Gerente de EPEL BALTEN de Tenerife. Balsas de Tenerife (BALTEN), Santa Cruz de Tenerife, España. E-mail: e.aguiar@blaten.es

1. INTRODUCCIÓN

El poli(cloruro de vinilo) plastificado ha sido el material más utilizado en el campo de la impermeabilización de balsas en España en las décadas 70-80. Contribuyeron a ello dos hechos diferentes: la aparición de una normativa para este producto y el Plan Hidrológico que la Comunidad Autónoma de Canarias.

Desde el primer punto de vista, el extinto IRANOR (Instituto para la Racionalización y Normalización del Trabajo) a finales de los años setenta crea un grupo de trabajo que elabora una normativa para las geomembranas de PVC-P a utilizar en este campo de la Tecnología y publica una norma para láminas homogéneas a la que seguirán otras para las reforzadas con fibra de vidrio y con inserción de tejidos sintéticos, en sus distintas vertientes tanto resistentes como no resistentes a los materiales bituminosos y para aplicaciones que abarcan desde la Ingeniería Civil hasta la Edificación. Con la entrada de nuestro país en la UE desaparece el citado Instituto y por imperativos europeos deja de ser oficial para pasar a manos privadas transformándose en el actual AENOR. La existencia de esta normativa con unas especificaciones claras a exigir y una metodología experimental adecuada hizo que el PVC-P sustituyera a las láminas de caucho butilo (IIR) que se venían empleando por aquellos tiempos (Blanco 2005).

Por otro lado, el anteriormente citado plan canario supuso el aprovechamiento y la gestión del agua en la Isla de Tenerife y construyó una serie de balsas que se impermeabilizaron con este tipo de material. Su control tanto en origen como a lo largo del tiempo contribuyó al empleo y desarrollo de los distintas láminas impermeables y, en particular, las de PVC-P (Amigó & Aguiar 1994, Aguiar & Blanco 1995).

El empleo de este producto vinílico tuvo su máximo apogeo en las fechas indicadas en este mismo epígrafe y se continuó empleando hasta la actualidad (Zapata *et al.* 2010) no solo en este campo, si no también en túneles (Usillos 2008), canales

(Machado 2004, Levita 2008), depósitos de residuos mineros (Rubín de Célix 2005) y presas (Scuero *et al.* 2010, Thanopoulos *et al.* 2010, Cazzuffi *et al.* 2010).

Aunque los polietilenos de distintas densidades son objeto de empleo en el dominio de la impermeabilización (Blanco *et al.* 2010a), es el polietileno de alta densidad (PEAD) el de uso más común. Geomembranas de esta naturaleza se vienen utilizando con profusión (Blanco & García 2010) desde hace años y algunas con unas prestaciones excelentes en el transcurso del tiempo como es el caso de la empleada en la balsa de Plá de Sant Jordi en Palma de Mallorca (Blanco *et al.* 2010b). El por qué de este empleo tan generalizado, hoy día, habría que buscarlo en dos factores. El primero de ellos radicaría en la parte económica pues existe una gran oferta y la competencia hace que sea bastante competitivo frente a barreras de otra naturaleza. El segundo factor sería la propia estructura del material ya que es una poliolefina muy estable, químicamente inerte y, por ello de gran durabilidad (Koerner 1999) de ahí su uso en la impermeabilización de vertederos (Giroud & Touze-Foltz 2003, Zornberg 2010).

El caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM) es el componente macromolecular de una geomembrana utilizada tanto en el campo de la Obra Hidráulica como en la Edificación (Puig 2010); en esta última aplicación su uso es bastante generalizado y se puede considerar que, quizás, sea la barrera geosintética de mayor uso en países como los Estados Unidos (Davis *et al.* 1998). En España su utilización en balsas, se ha ido incrementando con el tiempo y se dispone de experiencia de su comportamiento una vez instalada en obra (Abad *et al.* 2010, Blanco *et al.* 2010c).

Este trabajo trata de poner de manifiesto el comportamiento a lo largo del tiempo de tres geomembranas sintéticas constituidas por poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P), polietileno de alta densidad (PEAD) y caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico (EPDM), que forman



FIGURA 1. Balsa de Los Llanos de Mesa impermeabilizada con una geomembrana de PVC-P.



FIGURA 2. Balsa de San Isidro
cuya geomembrana
impermeable es de PEAD.

parte del sistema de impermeabilización de las balsas de Los Llanos de Mesa (Figura 1), San Isidro (Figura 2) y El Golfo (Figura 3), respectivamente.

2. LAS BALSAS

En anteriores trabajos se ha tratado de exponer el seguimiento de geomembranas de distinta naturaleza una vez instaladas en obra con objeto de comprobar su durabilidad (Blanco *et al.* 2005). Este trabajo es fruto de la colaboración del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Balsas de Tenerife (BALTEN), la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y CEMAGREF (Francia).

Las balsas seleccionadas para este estudio se hallan ubicadas en las Islas Canarias y sus características se presentan en la Tabla 1, donde se incluye capacidad, pendiente de taludes y cota y perímetro de coronación, así como su ubicación, naturaleza y espesor de la geomembrana, cantidad de material utilizado y año de puesta en obra.

3. EXPERIMENTAL

Inicialmente se determinaron las características de las barreras geosintéticas poliméricas antes de su instalación con objeto de comprobar su validez y, además, para tener un punto cero a la hora de realizar un control periódico de las mismas para lo cual

Característica	Balsa		
	Los Llanos de Mesa (LM)	San Isidro (SI)	El Golfo (EG)
Ubicación	San Juan de la Rambla	Granadilla de Abona	La Frontera
Capacidad, m ³	175,961	49,799	145,000
Altura, m	16.0	11.0	13.0
Cota de coronación, m	681.0	212.7	—
Perímetro de coronación, m	585.00	328.19	—
Pendiente de los taludes	—	—	2:1
Naturaleza de la geomembrana	PVC-P	PEAD	EPDM
Espesor de la geomembrana, mm	1.50	1.50	1.52
Material utilizado, m ²	22,930	8310	20,000
Año de instalación	1986	1991	1995

TABLA 1. Balsas cuyas geomembranas son objeto de este artículo.



FIGURA 3. Aspecto de la balsa de El Golfo impermeabilizada con una barrera geosintética polimérica a base de EPDM.

se ha ido extrayendo muestras en diferentes zonas de las balsas y se han repetido las pruebas, con el fin de comprobar la evolución de esas características a lo largo del tiempo. La metodología experimental empleada fue la desarrollada por la norma europea UNE-EN 13 361. Las pruebas de resistencia al punzonamiento se llevaron a cabo según tecnología desarrollada por parte de este equipo y que hoy forma parte del acerbo normativo español de AENOR. (Blanco *et al.* 1996, UNE 104 307).

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.

Todas las pruebas realizadas originalmente han superado los requerimientos mínimos exigidos a este tipo de geomembrana de acuerdo al Manual de balsas (2010) redactado por el CEDEX a petición del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

3.1. ENSAYOS COMUNES

3.1.1. Doblado a bajas temperaturas

Las probetas de los tres materiales provenientes de las balsas consideradas 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 propia constitución de la macromolécula que constituye la geomembrana y es una prueba para comprobar la idoneidad del material y no porque tenga que soportar esa temperatura una vez aplicado. Las temperaturas a las que se ha efectuado el doblado son las que figuran en la Tabla 2. La prueba ha sido superada por todas las barreras geosintéticas originalmente. Con el tiempo la

Material	Temperatura de ensayo, °C
EPDM	-55
PEAD	-75
PVC-P	-20

TABLA 2. Temperatura de flexión según la naturaleza de la geomembrana sintética.

membrana de PEAD y la de EPDM seguían superando las exigencias requeridas, no así la de PVC-P que en las muestras extraídas de la zona norte no superaban la prueba a los 13 años mientras que las tomadas en el área sur de la balsa se agrietaban a los veinte años.

3.1.2. Resistencia mecánica a la percusión

En cuanto al impacto dinámico, las muestras de termoplásticos sometidas a estudio superaron originalmente la prueba de resistencia mecánica a la percusión, pues tras 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 sufre perforación en la zona de impacto, como se pone de manifiesto al realizar una posterior prueba de estanquidad. En el caso del termoestable la altura de caída del percutor fue de 350 mm que fue superada por la muestra procedente de la balsa de El Golfo.

Este ensayo es interesante teniendo en cuenta los problemas que pueden presentarse durante el proceso de puesta en obra y los posteriores, como fruto del vandalismo. A nivel general, a medida que transcurre el tiempo desde la instalación, la altura de caída del percutor sin deteriorar al material, se hace menor como consecuencia del envejecimiento de la resina y en el caso del PVC-P, además, por la pérdida de plastificantes. En el caucho se produce una mejora notable en este comportamiento ya que al cabo de unos dos años de su puesta en obra el material es capaz de superar los 500 mm como los termoplásticos, hecho atribuible a la total vulcanización del elastómero.

Años	Resistencia a la tracción, MPa			Alargamiento en rotura, %		
	EPDM	PEAD	PVC-P*	EPDM	PEAD	PVC-P*
0	10.0	38.0	1325	553	1083	22
5	10.1	24.1	1630	410	612	23
6	10.3	27.1	1493	358	689	22
7	10.9	26.4	1478	359	692	23
8	10.8	27.6	1460	396	725	23
9	10.7	21.1	1440	352	410	23
10	10.4	24.2	1488	325	532	24
11	10.3	23.4	1433	337	610	24
12	9.4	34.5	1465	283	639	23

* Al ser una lámina reforzada la resistencia a la tracción se expresa en N/50 mm y el alargamiento es en el punto de carga máxima.

TABLA 3. Evolución de las características de tracción con el tiempo.

3.1.3. Características de tracción

Los valores de la resistencia a la tracción y del alargamiento en la rotura se muestran en la Tabla 3. En el elastómero al cabo de los doce años de instalada la lámina no se observan variaciones notables en la resistencia a la tracción; en el caso del polietileno de alta densidad, salvo una disminución importante inicial, la carga se mantiene. En el poli(cloruro de vinilo) plastificado la resistencia a la tracción y el alargamiento en la rotura no experimentan cambios apreciables debido a que el tejido de poliéster del refuerzo es el responsable de estas propiedades y en un periodo de doce años no ha sido atacado por las radiaciones ultravioleta procedentes del sol ya que está protegido, todavía por la resina que se encuentra en buen estado. En el PEAD, también se ha determinado la evolución del esfuerzo y el alargamiento en el punto de fluencia comprobándose que el esfuerzo varía desde 22.9 MPa hasta 21.3 MPa a los doce años, mientras que la elongación en dicho punto oscila alrededor del 13%. El alargamiento en rotura en

las dos geomembranas homogéneas disminuye con el tiempo, especialmente en el material termoestable.

La Tabla 4 intenta poner de manifiesto la influencia de la orientación en el deterioro de las geomembranas, para ello se presentan los resultados a los nueve años de exposición a la intemperie. Las muestras se han extraído en la coronación del talud en las áreas norte y sur. Las pruebas consideradas para este estudio de cómo pueden influir las radiaciones ultravioleta sobre el material han sido las que se consideran más significativas: resistencia a la tracción, alargamiento en rotura y resistencia a la perforación o punzonamiento estático. Se puede comprobar que la influencia en el caucho es inexistente y baja en el PEAD. El que no se detecten cambios apreciables en el PVC-P se debe al refuerzo que lleva la geomembrana, por lo que estas propiedades en este caso no serían significativas durante los primeros años de vida útil de este material y habría que recurrir a otras como la pérdida de plastificantes y el doblado a bajas temperaturas para notar los mencionados cambios.

Característica	Naturaleza de la geomembrana		
	EPDM	PEAD	PVC-P
Resistencia a la tracción, MPa			
– Norte	10.7	29.9	1.440*
– Sur	10.6	34.3	1.485
Alargamiento en rotura, %			
– Norte	352	705	23*
– Sur	359	888	21
Recorrido del punzón, mm			
– Norte	32	12	13
– Sur	32	10	15

* Al ser una lámina reforzada la resistencia a la tracción se expresa en N/50 mm y el alargamiento es en el punto de carga máxima.

TABLA 4. Influencia en la orientación en el comportamiento de las geomembranas de EPDM, PEAD y PVC-P a los nueve años de su instalación.

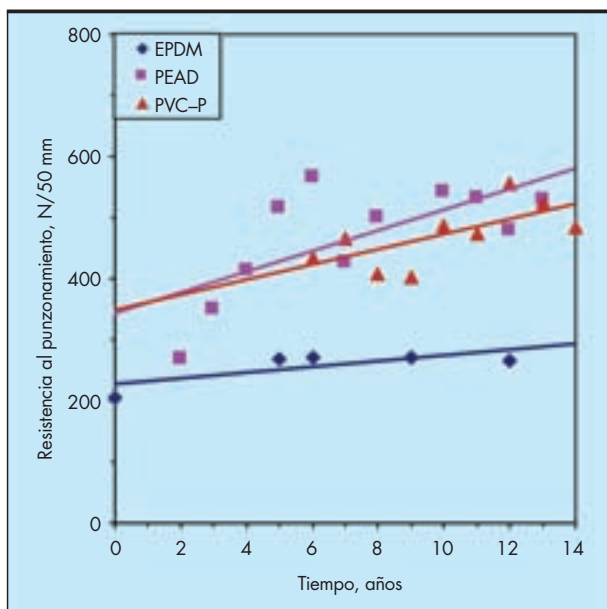


FIGURA 4. Variación de la resistencia al punzonamiento, en función del tiempo.

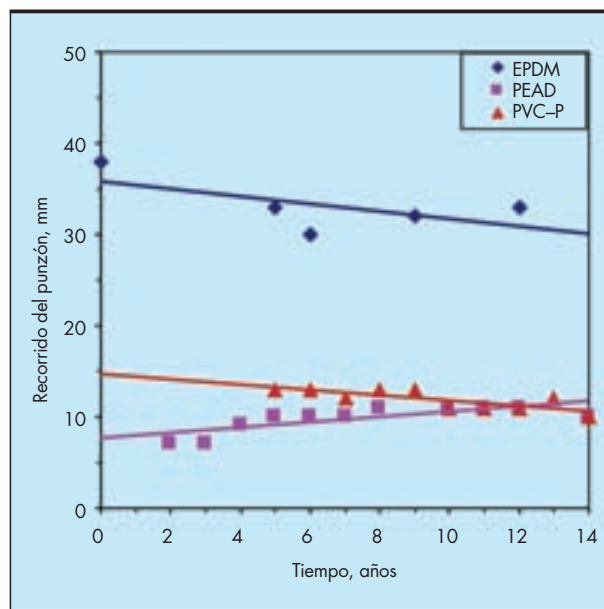


FIGURA 5. Evolución del recorrido del punzón antes de perforar, en función del tiempo.

3.1.4. Resistencia al punzonamiento

Las Figuras 4 y 5 representan la variación de la resistencia al punzonamiento y el recorrido del punzón antes de perforar, respectivamente, para las geomembranas procedentes de las balsas consideradas. 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 del EPDM, no obstante su valor al cabo de los doce años es superior a la inicial de los dos termoplásticos considerados. El comportamiento al impacto estático es, notablemente, mejor en los elastómeros que en los termoplásticos de PEAD y PVC-P, contrariamente a lo que sucede con el impacto dinámico.

3.1.5. Resistencia de las soldaduras

La resistencia de la soldadura determinada por el procedimiento de tracción, ha conducido a resultados correctos, ya que las muestras rompen en el borde o en las proximidades de la soldadura, pero fuera de la unión propiamente dicha; los valores alcanzados se presentan en la Figura 6.

3.1.6. Microscopia óptica y electrónica de barrido

La evaluación microscópica de las geomembranas de caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico se ha efectuado en las condiciones experimentales indicadas en la bibliografía (Soriano *et al.* 2006, 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. La Figura 7 representa la cara externa a 60 aumentos de las distintas geomembranas a los diez años de colocadas en obra. Asimismo, se ha comprobado el estado de las citadas geomembranas por microscopia electrónica de barrido o "scanner" a (x 90) y (x 900) aumentos. La Figura 8 muestra el aspecto de los materiales en su cara externa a 90 aumentos a los diez años de instaladas.

La microscopia óptica de reflexión muestra una geomembrana de PVC-P con un envejecimiento importante como lo ponen de manifiesto la abundancia de microporos y síntomas de cuarteamiento superficial. En la lámina de PEAD se detectan estrias de manipulación, aunque tanto este material como el caucho presentan superficies homogéneas y uniformes.

La microscopia electrónica de barrido confirma lo observado por la microscopia óptica, detectando además microfisuras en la geomembranas del elastómero.

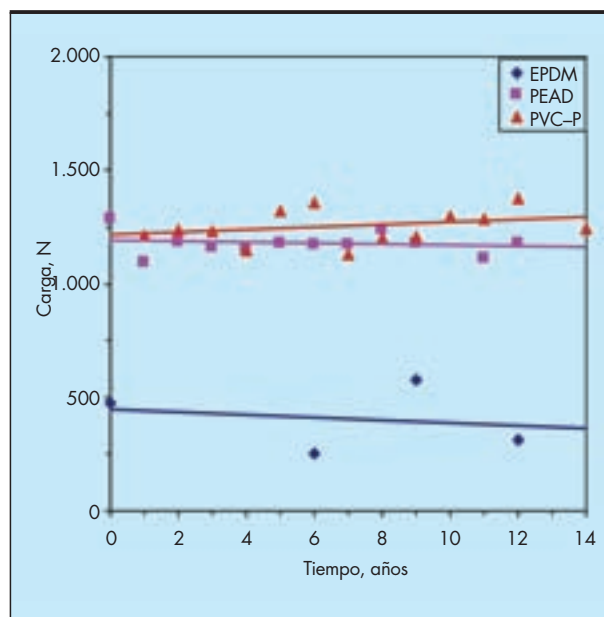


FIGURA 6. Evolución de la resistencia a la soldadura por tracción, en función del tiempo.

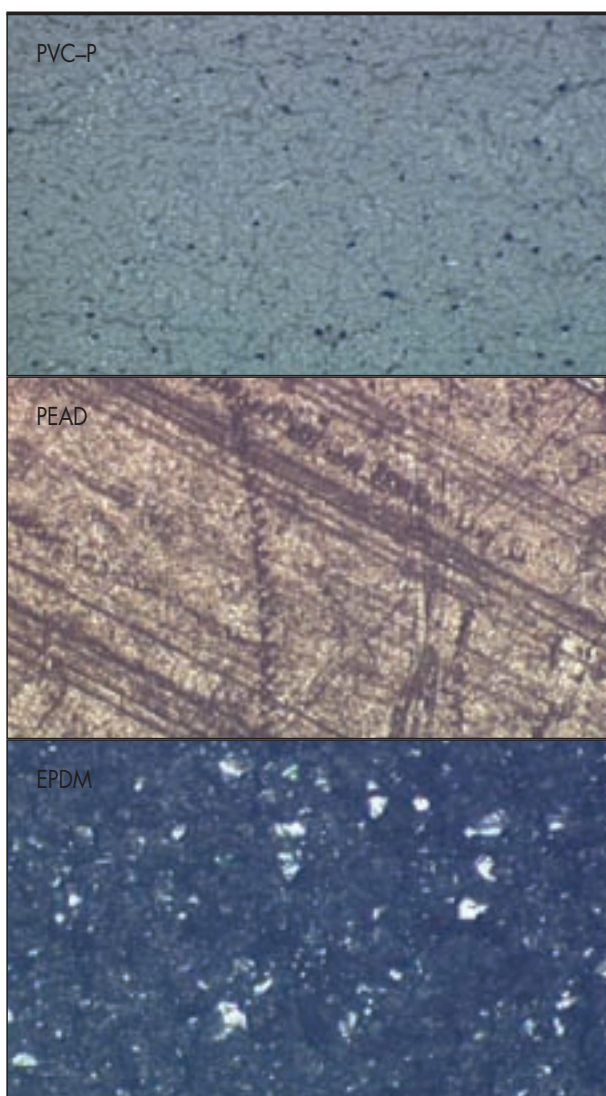


FIGURA 7. Microfotografías (x 60) de la cara externa de las geomembranas a los diez años de su instalación por microscopía óptica de reflexión.

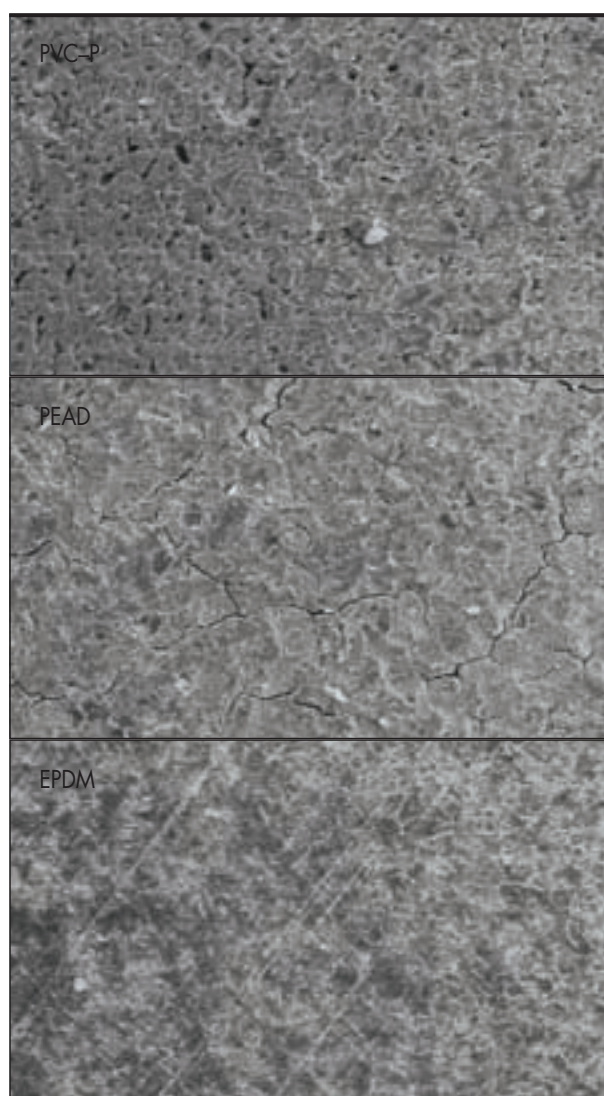


FIGURA 8. Microfotografías (x 90) de la cara externa de las geomembranas a los diez años de su instalación por microscopía electrónica de barrido.

3.2. ENSAYOS PARTICULARES

3.2.1. Dureza Shore

La Tabla 5 muestra los datos alcanzados a lo largo de doce años de las geomembranas de EPDM (Dureza Shore-A) y de PEAD (Dureza Shore-D). En el elastómero la dureza tiende a incrementarse con el tiempo, mientras que en el termoplástico la dureza se mantiene o presenta una ligera tendencia a disminuir.

3.2.2. Resistencia al desgarro

En la Figura 9 se muestra la evolución de la resistencia al desgarro del polietileno de alta densidad durante catorce años a partir de su puesta en obra. No se observa una variación apreciable durante este periodo. Se lleva a cabo este ensayo en el seguimiento en obra de los polietilenos por haberse dado algún caso aislado de desgarro, sobre todo, en las proximidades de la unión entre paños debido al debilitamiento producido en el proceso de la soldadura.

Años	Dureza Shore	
	A (EPDM)	D (PEAD)
0	64	59
5	72	61
6	71	60
7	70	58
8	70	56
9	74	61
10	71	57
11	72	58
12	76	58

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

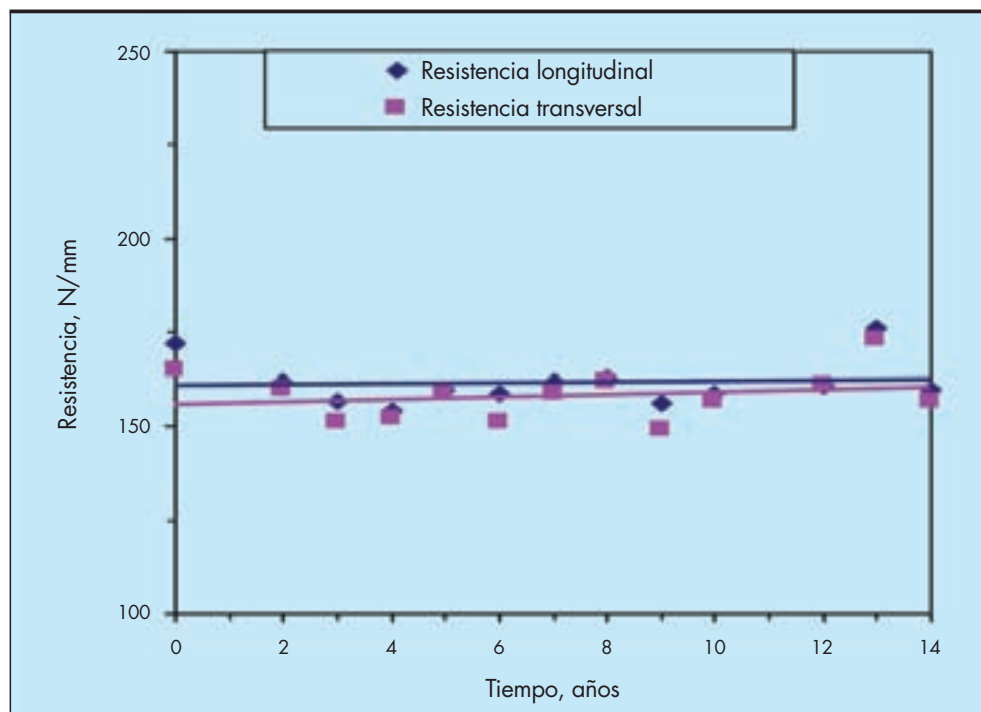


FIGURA 9. Evolución de la resistencia al desgarro en el PEAD.

3.2.3. Negro de humo

El contenido en negro de carbono o de humo ha sido 2.5% en el PEAD, correcto ya que estaba comprendido entre el 2 y el 3% que es lo recomendado. La Figura 10 muestra la dispersión del negro de humo de la geomembrana considerada cuya asignación fue 2 en una escala 1-7, donde cuanto más bajo es el guarismo, mejor es la citada dispersión.

3.2.4. Plastificantes

En la lámina de poli(cloruro de vinilo) plastificado, (PVC-P) se ha determinado el contenido inicial de plastificante que alcanzó un valor del 32.2%. Se ha hecho un seguimiento durante 20 años para comprobar su evolución una vez instalada en la obra. En la Figura 11 se presenta la pérdida de este aditivo, no solamente en muestras extraídas del talud norte, sino también en el sur, observándose que la pérdida ha sido de un 38.8 en el sur por un 45.3% en el norte; es decir que el talud norte por estar



FIGURA 10. Fotografía de la dispersión del negro de humo.

dirigido al sur es donde más inciden las radiaciones y por ello es la parte más deteriorada del material colocado en la balsa.

Los plastificantes que formaron parte de la formulación de la lámina se han determinado por extracción con éter etílico siguiendo los procedimientos citados en la bibliografía científica (Crespo 2011). A continuación se sometieron a una espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier obteniéndose unas bandas propias de los ftalatos de alquilo (Blanco *et al.* 2008).

La identificación del aditivo se llevó a cabo utilizando la técnica de Cromatografía de Gases combinada con la Espectrometría de Masas (CG-MS). 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.* 2010d).

La cromatografía de gases generó un cromatograma en el que aparecían dos picos a tiempos de retención 57.61 y 82.05 minutos, en porcentajes de 3.0 y 97.0, respectivamente, lo que era indicativo de la existencia de dos plastificantes diferentes en la formulación de esta lámina.

A continuación, los dos productos aislados, correspondientes a los dos picos, se sometieron a una espectrometría de masas cuyos resultados se presentan a continuación:

Los datos del pico, que en el cromatograma aparecía a 57.61 minutos fueron: MS, m/e(intensidad relativa): MS, m/z(intensidad relativa): 390(M⁺), 279(C₁₆H₂₃O₄⁺,10), 167(C₈H₇O₄⁺,30), 149(C₈H₅O₃⁺,100), 71(C₅H₁₁⁺,14), 57(C₄H₉⁺,22). Estas fragmentaciones son indicativas de la presencia de ftalato de bis (2-etilhexilo).

El segundo pico condujo a los siguientes datos: MS, m/e(intensidad relativa): 446(M⁺), 307(C₁₈O₄H₂₇⁺,25), 167(C₈H₇O₄⁺,19), 149(C₈H₅O₃⁺,100), 85(C₆H₁₃⁺,25), 57(C₄H₉⁺,29). Las fragmentaciones indican la presencia de ftalato de diisodécilo.

Debido a la existencia de estos dos aditivos se procedió al cálculo de su peso molecular medio (Wilson 1995) que resultó ser 440.44, valor superior a 400 que es indicativo de una gran durabilidad de la geomembrana según lo señalado en la literatura científica (PGI 2004, Blanco *et al.* 2008).

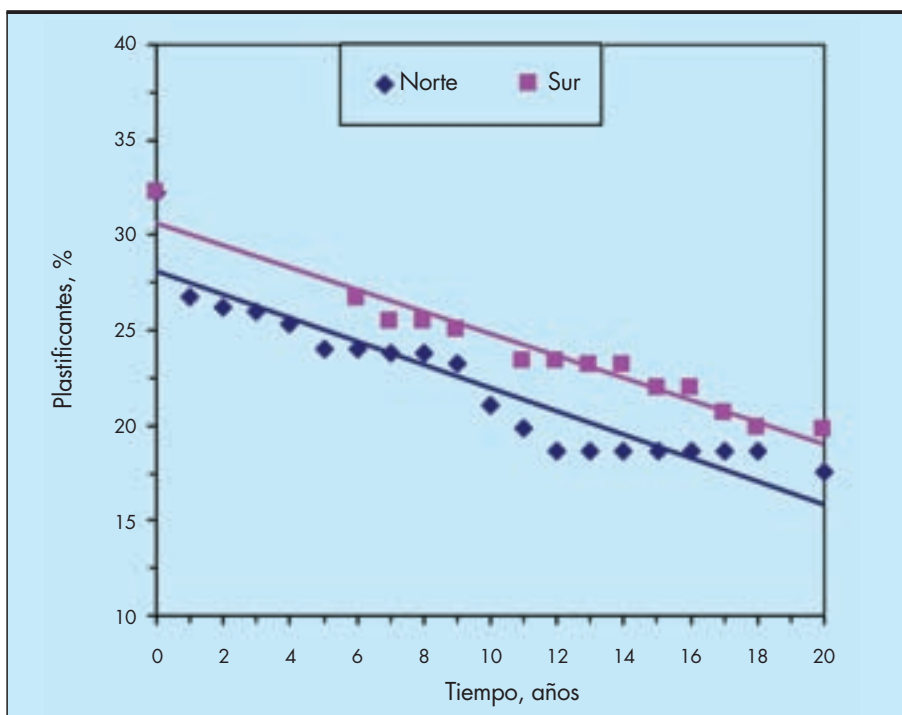


FIGURA 11. Pérdida de plastificantes con el tiempo.

4. CONCLUSIONES

Inicialmente todas las geomembranas superaron los requisitos mínimos exigidos en la normativa vigente, sin embargo hay que tener en cuenta que todo material macromolecular por su naturaleza orgánica sufre un proceso de envejecimiento con el tiempo que será mayor o menor dependiendo de las condiciones adversas de su lugar de instalación, particularmente, de la incidencia de las radiaciones solares.

Como estudio comparativo del comportamiento de los tres materiales podríamos resaltar lo siguiente:

- El doblado a bajas temperaturas es correcto a lo largo del tiempo de evolución excepto en el PVC-P cuyas probetas extraídas de la zona norte sufrían agrietamiento a los trece años de instalación, mientras que las tomadas en la sur lo hacían a los veinte años.
- Las características de tracción indican una pérdida del alargamiento en todos los casos, menos en el PVC-P pues el textil del refuerzo no ha sido todavía atacado por las radiaciones solares ya que está protegido por la resina y, por tanto, no evidencia cambio alguno.
- El mejor comportamiento al impacto estático es el del EPDM que al cabo de los años presenta un mayor recorrido del punzón antes de perforar, incluso superior al inicial de los dos termoplásticos. En el impacto dinámico el comportamiento se invierte siendo mejor en los termoplásticos que en el termoestable.
- Las pruebas de microscopia ponen de manifiesto unas superficies homogéneas y uniformes con débiles síntomas de envejecimiento y algunas microfisuras.
- La dureza Shore se incrementa con los años de puesta en obra en el elastómero mientras que en el polietileno de alta densidad se mantiene, con una cierta tendencia a disminuir.

- Se han determinado los aditivos de plastificación del poli(cloruro de vinilo) que resultó ser una mezcla de ftalato de bis(2-etilhexilo) y ftalato de diisodécilo que al calcular su peso molecular medio dio un valor elevado lo que confiere a la geomembrana una notable durabilidad. Sin embargo, los radicales alquílicos que sustituyen al protón del ácido ftálico son ramificados lo que los hace susceptibles de una migración importante al aire.

Los tres materiales considerados son idóneos para su empleo en la impermeabilización en la obra hidráulica. No tendría sentido decir cual es el mejor o el de un comportamiento superior. La naturaleza de la geomembrana no es un factor decisivo, puede ser termoplástico o termoestable con tal de que su formulación sea correcta. La elección de uno de ellos será función de una serie de factores, desde el económico a la propia funcionalidad de la balsa.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, G., Ortas, J. y Blanco, L. 2010. Proyecto, construcción y puesta en servicio del nuevo embalse de reserva de para la ETAP de Torrealta en Orihuela (Alicante). *Proc. 3^{er} Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3^{er} Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 555-575. Barcelona, octubre.
- Aguiar E. y Blanco, M. 1995. Experience in Connection with the Performance of Plasticized poly(vinyl chloride) Sheeting in Tenerife Basin Sealing. *Proc. Symposium on Research and Development in the Field of Dam*: 361-375. Crans-Montana (Suiza), septiembre.
- 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 *Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas*. Sevilla.
- Blanco M., Aguiar, E., Cea, J. C. de, Castillo, F. y Soriano, J. 2010a. El polietileno en la impermeabilización de balsas. *Ing. Civil*: 159, 57-64.
- Blanco, M., Aguiar, E., García, F., Vara, T., Soriano, J. y Castillo, F. 2010c. Estado de la barrera geosintética polimérica de EPDM de la balsa de El Golfo en la isla de El Hierro. *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 181-192. Barcelona, octubre.
- 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. y García, F. 2010. Control periódico de barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P) en Obras Hidráulicas durante el año 2.009. *Aislamiento e impermeabilización*: 55, 14-21.
- Blanco, M., García, F., Soriano, J., Aguiar, E. y Vara, T. 2005. Comportamiento de geomembranas sintéticas a base de PVC-P, PEAD y EPDM utilizadas en la impermeabilización de embalses. *Ing. Civil*: 138, 39-45.
- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Aguiar, E., Castillo, F. y Crespo, M. A. 2010d. Influencia del tipo de plastificante en la durabilidad de las geomembranas de PVC-P. *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 347-357. Barcelona, octubre.
- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Castillo, F. y Aguiar, E. 2008. Estudio de plastificantes utilizados en geomembranas de PVC-P empleadas en impermeabilización de obras hidráulicas. *Rev. Plast. Modernos*: 96 (629), 386-391.
- Blanco, M., Santarrufina E., Castillo, F., Soriano, J. y García, F. 2010b. Comportamiento de la geomembrana de polietileno de alta densidad (PEAD) instalada en la balsa de Plá de Sant Jordi (Palma de Mallorca). *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 67-81. Barcelona, octubre.
- Cazzuffi, D., Giroud, J.P., Scuero, A and Vascchetti, G. 2010. Geosynthetic barriers systems for dams. *Keynote lecture, 9th International Conference on geosynthetics*, 115-163 Guarujá, Brazil.
- 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.
- Davis, J. A., Hoff, J. L., Kalwara, J. J. y Kane, E. G. 1998. A review of EPDM Systems Development *Proc. X International Congress: International Waterproofing Association*: 263-274. Copenhagen.
- Giroud, J. P. y Touze-Foltz, N. 2003. Geomembranes for Landfills. *Geosynthetics International*. Vol 10, N° 4: 124-133.
- Koerner, R. M. 1999. Designing with Geomembranes. *Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA*, 292, 4th edition.
- Levita, A. 2008. Impermeabilización de canales. *Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 87-101 Palma de Mallorca.
- Machado do Vale J. L. 2004. Estado de la impermeabilización con geomembranas sintéticas en Portugal, *Proc. Jornadas sobre Impermeabilización con Materiales Sintéticos*. La Palma (España).
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino 2010. Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas. Madrid.
- Puig, J. L. 2010. De la obscuridad a la quinta fachada. Impermeabilización con láminas sintéticas de caucho EPDM. *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 95-113. Barcelona, octubre.
- PVC Geomembrane Institute (PGI) 2004. *PVC Geomembrane Material Specification 1104*. University of Illinois, Urbana, IL.
- Rubín de Célix, M. 2005. Balsas de residuos industriales. *Proc. Congreso Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: Vol. I. Sevilla, noviembre-diciembre.
- Scuero, A., Vascchetti, G. y Bacchelli, M. 2010. A double geomembrane system waterproofings new reservoir in France. *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 659-673 Barcelona.
- Soriano, J., Blanco, M., Aguiar, E. y Burgos, J. 2010. La microscopia como método de análisis en el estudio de geomembranas sintéticas de PVC-P. *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 411-422 Barcelona.
- Soriano J., Blanco, M., Aguiar, E. y Cea, J. C. de 2006. Las técnicas de microscopia óptica de reflexión y electrónica de barrido en el conocimiento del estado de las geomembranas sintéticas. *Ing. Civil*: 143, 17-22.
- Thanopoulos, Y., Scuero, A y Vascchetti, G. 2010. Exposed geomembrane system at Messochora Concrete Face Rockfill Dam. II. Romeo *et al.* (eds.). *Dam Maintenance and Rehabilitation*. Taylor & Francis Group:889-895. London.
- UNE-EN 13 361:2005 Barreras geosintéticas. Características para su utilización en la construcción de embalses y presas.
- UNE 104 317:2011. Materiales sintéticos. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas.
- Usillos, P. 2008. Impermeabilización de túneles. *Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*: 61-85. Palma de Mallorca.
- Wilson, A. S. 1995. Plasticizers: Principles and Practice. *Institute of Materials*. London.
- Zapata, F. A., Pérez, M. y Soriano, B. 2010. Impermeabilización con geomembrana de un embalse mixto (hormigón-materiales sueltos) en Orihuela (Alicante). *Proc. 3er Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación, Obra Civil y Balsas y 3er Simposio Nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*. 235-249 Barcelona.
- Zornberg, J. G. 2010. Utilización de geosintéticos en vertederos. *Conferencia sobre utilización de geosintéticos en vertederos. IGS y CEDEX*, Madrid, septiembre.