

El polietileno en la impermeabilización de balsas⁽¹⁾

BLANCO, MANUEL (*); AGUIAR, ESCOLÁSTICO (**); CEA, JUAN CARLOS DE (***);
CASTILLO, FRANCISCA (*) y SORIANO, JESÚS (*)

RESUMEN En este trabajo se contempla el comportamiento de láminas de distintos tipos de polietilenos utilizadas como barreras geosintéticas poliméricas en el campo de la impermeabilización de balsas.

Se presentan los resultados relativos a sus propiedades más importantes desde el punto de vista de su evolución en el tiempo que hacen referencia a resistencia a la tracción, alargamiento en rotura, resistencia al desgarro, resistencia al punzonamiento estático, doblado a bajas temperaturas, resistencia mecánica a la percusión, resistencia de la soldadura, contenido y dispersión de negro de humo, microscopia óptica de reflexión y microscopia electrónica de barrido.

POLYETHYLENE IN WATERPROOFING OF RESERVOIRS

ABSTRACT *This paper provides to show the performance of sheets based on different types of polyethylene used as polymeric geosynthetic barriers in the waterproofing of reservoirs.*

The most important characteristics were evaluated in function of time once applied in reservoirs and they were the following ones: tensile properties, tear resistance, impact resistance, static perforation, low temperature folding, joint strength, joint peel resistance, carbon black, content and dispersion, optic microscopy and electron microscopy "scanner".

Palabras clave: Polietileno, Impermeabilización, Geomembranas.

Keywords: Polyethylene, Waterproofing, Geomembranes.

1. INTRODUCCIÓN

El polietileno es una poliolefina que se emplea en el campo de la impermeabilización en formas diferentes. Se puede decir que el polietileno de baja densidad (PEBD) ha sido la primera lámina sintética que se utilizó en España, incluso antes que el caucho butilo; si bien el polietileno de baja densidad se emplea enterrado o protegido y con espesores muy bajos por lo que más que de lámina debería hablarse de "film" o película. Un recorrido por la geografía de las balsas españolas permite encontrar casos con ejemplos de utilización de esta poliolefina con una duración superior a los treinta años, tal es la balsa de El Fraile en el sur de la isla de Tenerife.

Tras el empleo de lo que podríamos considerar como primera geomembrana sintética que era el termoestable caucho butilo (IIR) se empezó a utilizar como lámina impermeable el poli(cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P) que en esta época tenía cierta vigencia en el campo de la impermeabilización en la Edificación (1). Posteriormente, el polietileno de alta densidad no

tarda en entrar en el mercado como fuerte competidor del mencionado material vinílico, siendo quizás la zona de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, donde tiene lugar una mayor utilización del mismo como en las balsas de Villalar de los Comuneros, El Barco de Ávila, Hoyo de Pinares y las ubicadas en las comarcas leonesas del Páramo Bajo y de los Payuelos; pronto su uso se hará extensivo a todo el territorio nacional.

A nivel internacional la primera presa impermeabilizada con PEAD la data la Comisión Internacional de Grandes Presas en Insalu (Nigeria) en 1986. Los primeros embalses impermeabilizados con este material se realizaron en Estados Unidos en el año 1987, se trata de San Justo y Stillwater (2).

El CEDEX está realizando un amplio trabajo de investigación para la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Balsas de Tenerife (BALTEN) y el Cabildo Insular de La Palma. Las balsas cuyo seguimiento se está llevando a cabo sobrepasan el centenar. Estas investigaciones con extracciones periódicas han permitido un mejor conocimiento del comportamiento en obra de geomembranas de distinta naturaleza (3-10).

En este trabajo nos referiremos, únicamente, al comportamiento, en el tiempo, de cuatro tipos de polietilenos empleados en el sistema de impermeabilización de otras tantas balsas: polietileno de alta densidad, PEAD (Los Cabezos), polietileno de media densidad, PEMD (El Saltadero), polietileno de muy baja densidad, PEMBD (El Cerrillo del Libro) y polietileno de baja densidad, PEBD (Plá Mateos).

(*) Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX).

(**) Balsas de Tenerife (BALTEN).

(***) Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

(1) Parte de este artículo constituyó una comunicación al III Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas a celebrar en el ámbito del III Congreso Nacional de Impermeabilización (Barcelona, 2010).

2. POLIETILENOS

El polietileno (PE) es la poliolefina más sencilla. Su macromolécula es lineal, por tanto al no contener en su cadena carbonos terciarios, su oxidación es bastante difícil. No obstante, en ocasiones esa cadena puede tener algún carbono terciario, procedente de procesos secundarios de polimerización (homopolímero) o por el material llevar incorporado otro monómero, casos del n-hexeno, n-octeno o n-buteno (copolímero) (11-13). Esto explica, que casi siempre se incorpore al proceso de fabricación una pequeña cantidad de antioxidantes (14), entre otros aditivos, para evitar la degradación ya sea durante el periodo de fabricación, ya sea una vez instalada la geomembrana en obra.

Como poliolefina presenta en sus cadenas, exclusivamente, enlaces "tipo *sigma*", es decir uniones muy fuertes entre los átomos que las constituyen, por lo que la durabilidad de las mismas es elevada. Esa gran resistencia desde el punto de vista químico, como consecuencia de su estructura de parafina, se debe a que no puede formar parte de reacciones heterolíticas y solamente, en casos extremos, podría reaccionar homolíticamente, vía radicales libres.

El producto no deja de ser un material orgánico y, como toda sustancia orgánica, tiende a envejecer y, por tanto, a desaparecer. Por este motivo, se le añaden una serie de aditivos para lograr una larga vida útil. De todos ellos, los más importantes son los absorbentes de luz UV y entre estos, cabe destacar el negro de humo que se incorpora a la resina en una proporción comprendida entre el 2 y el 3%. Cantidades inferiores serían insuficientes para evitar la degradación por las radiaciones solares. Proporciones mayores conllevarían una cierta pérdida de propiedades, sobre todo mecánicas, ya que estaríamos sustituyendo sustancias muy nobles como son las resinas por productos poco nobles como las cargas. La utilización como absorbente de luz UV del negro de humo o negro de carbono se debe a sus costes, relativamente bajos. Si es importante el contenido en negro de humo correcto, lo es más aún su adecuada dispersión. El aditivo debe estar repartido de una forma homogénea a lo largo de la lámina, pues de lo contrario las características pueden variar notablemente de unos puntos a otros y producirse fallos mecánicos y ataques por ra-

diaciones solares; los primeros en los lugares donde haya altas concentraciones de negro de carbono, los segundos donde haya escasez del mismo.

A efectos de su aplicación en este campo de la Ingeniería Civil se puede utilizar polietileno de baja densidad (PEBD) que presenta un número elevado de ramificaciones y por ello baja cristalinidad; polietileno lineal de baja densidad (PELBD) con un grado de ramificación no tan elevada como el anterior y con presencia de alfa-olefinas en su macromolécula y que a efectos de este artículo denominaremos polietileno de media densidad (PEMD); polietileno de muy baja densidad (PEMBD) considerado como una especialización del PELBD en el que se incrementan las cadenas cortas y el número de ramificaciones y, por ello, no cristalino y, por último, polietileno de alta densidad (PEAD) donde, apenas existen ramificaciones en la cadena principal y por ello presenta un alto grado de cristalinidad con un punto de fluencia bien definido, por lo cual sus características mecánicas deben referirse tanto a él como al punto de rotura (15).

En la actualidad en España, el polietileno de alta densidad (PEAD) se puede considerar el material más utilizado para la impermeabilización de balsas o pequeños embalses. En este trabajo haremos referencia a este material constituyente de la barrera geosintética polimérica (GBR-P) procedente de la balsa de Los Cabezos, situada en Villena, provincia de Alicante y estudiaremos sus propiedades iniciales y su evolución a lo largo de ocho años de su instalación en obra, estableciendo una comparación con láminas confeccionadas con otros tipos de polietilenos como el de media densidad (PEMD) procedente del campo experimental que el CEDEX y BALTEN tienen instalado en el municipio de Granadilla de Abona, en el recinto del embalse cubierto de El Saltadero, al sur de la isla de Tenerife, así como con la geomembrana de polietileno de muy baja densidad (PEMBD) colocada en la balsa de El Cerrillo del Libro en el ayuntamiento de El Ejido (Almería) y el "film" de polietileno de baja densidad (PEBD) que enterrado constituye la barrera impermeable del embalse de Plá Mateos, en el municipio de Alicante. En la tabla 1 se presentan las características de las balsas donde se instalaron láminas de polietileno como pantalla impermeabilizante. En la figura 1 se presenta la balsa almeriense de El Cerrillo del Libro.

Característica	Balsa			
	Los Cabezos	El Cerrillo del Libro	Plá Mateos	El Saltadero
Ubicación:				
Municipio	Villena	El Ejido	Alicante	Granadilla de Abona
Provincia	Alicante	Almería	Alicante	Tenerife
Capacidad, m ³	640.000	110.000	500.000	458.000
Altura, m	10	11	13	21
Cota, m	532	277	-	112
Pendiente de taludes	3/1	1,28/1	4/1	1,75/1
Perímetro de coronación, m	1.111	440	1.323	699
Tipo de PE empleado	PEAD	PEMBD	PEBD	PEMD
Espesor, m	2,0	1,8	0,3	1,5
Material utilizado, m ²	176.000	15.000	131.544	*
Año de instalación	1.999	1.998	1.995	1.997

TABLA 1.
Características de las balsas evaluadas.
(* Paños instalados en el campo experimental.



FIGURA 1. Balsa de El Cerrillo del Libro (El Éjido-Almería) impermeabilizada con polietileno de muy baja densidad.

3. EXPERIMENTAL

En primer lugar, se comprobaron las características de los materiales iniciales y que sirvieron de base para su posterior seguimiento. A continuación, y después de su instalación se realizó un control periódico del material. La metodología experimental empleada se encuentra ampliamente detallada en la bibliografía científica (16-17). Las pruebas a realizar durante el mencionado control periódico son las siguientes:

- Espesores
- Características de tracción
- Resistencia al desgarro
- Doblado a bajas temperaturas
- Resistencia mecánica a la percusión (Impacto dinámico)
- Resistencia a la perforación (Impacto estático)
- Resistencia de la soldadura por tracción
- Resistencia de la soldadura por pelado
- Contenido y dispersión del negro de humo
- Microscopía óptica
- Microscopía electrónica de barrido

3.1. RESISTENCIA AL DESGARRO

En la tabla 2 se presenta la evolución de la resistencia al desgarro de los polietilenos a los ocho años de su puesta en obra. En la figura 2 se muestra un aspecto de la balsa de Los Cabezos, ubicada en el municipio de Villena en la provincia de Alicante, impermeabilizada con polietileno de alta densidad.

3.2. RESISTENCIA AL IMPACTO DINAMICO Y ESTATICO

A excepción del material procedente de Plá Mateos, las muestras del resto de polietilenos sometidas a ensayo y extraídas al cabo de los ocho años de su instalación superan la prueba de resistencia mecánica a la percusión, ya que al lanzar el percutor normalizado desde una altura de 500 mm no se aprecia perforación en la zona de contacto, como se comprobó al llevar a cabo un ensayo de estanquidad una vez efectuada dicha percusión. El motivo de no superar la prueba el polietileno de baja densidad es debido a su bajo espesor (0,3 mm).

La tabla 3 presenta los valores de resistencia a la perforación y recorrido del pistón antes del punzonamiento para las muestras de los materiales impermeabilizantes considerados.

Balsa	Sentido	Resistencia al desgarro, N/mm				
		Tiempo de instalación, años				
		0	3	5	6	8
Los Cabezos (PEAD)	Longitudinal	162	179	179	162	167
	Transversal	154	174	167	161	167
El Cerrillo del Libro (PEMBD)	Longitudinal	103	100	93	97	96
	Transversal	98	97	93	95	94
Plá Mateos (PEBD)	Longitudinal	92	99	87	96	84
	Transversal	84	95	80	78	79
El Saltadero (PEMD)	Longitudinal	99	106	109	106	105
	Transversal	99	103	103	101	103

TABLA 2. Resistencia al desgarro de los materiales evaluados en función del tiempo de instalación.



FIGURA 2. Balsa de Los Cabezos (Villena-Alicante) cuya pantalla impermeabilizante está constituida por polietileno de alta densidad.

Balsa (Material)	Característica	Tiempo de instalación, años									
		0		3		5		6		8	
		E*	I	E	I	E	I	E	I	E	I
Los Cabezos (PEAD)	Resistencia al punzonamiento, N/mm	540	510	740	575	627	521	663	601	677	585
	Recorrido, mm	11	12	12	14	11	13	12	14	12	14
El Cerrillo del Libro (PEMBD)	Resistencia al punzonamiento, N/mm	583	562	557	543	494	472	579	513	577	506
	Recorrido, mm	51	51	51	50	50	50	52	48	52	46
Plá Mateos (PEBD)	Resistencia al punzonamiento, N/mm	596	577	574	414	588	552	676	500	703	660
	Recorrido, mm	13	13	17	11	13	13	21	14	21	20
El Saltadero (PEMD)	Resistencia al punzonamiento, N/mm	534	498	490	476	480	417	584	545	595	605
	Recorrido, mm	20	18	15	15	13	12	21	20	20	20

TABLA 3. Resistencia al punzonamiento estático y recorrido del punzón antes de la perforación. (*) E representa cara externa e I cara interna.

3.3. DOBLADO A BAJAS TEMPERATURAS

Las probetas de las geomembranas se sometieron a una prueba de flexión a bajas temperaturas, para ello se doblaron las probetas sobre si mismas un ángulo de 180°, después de permanecer 5 h en una cámara frigorífica a una temperatura de -75°C. Luego se comprobó si aparecían síntomas de agrietamiento, roturas u otras imperfecciones superficiales. Tanto inicialmente como en el tiempo de evaluación los materiales superaron las exigencias del ensayo. En la figura 3 se presenta la balsa de Plá Mateos impermeabilizada con PEBD.

3.4. CARACTERÍSTICAS DE TRACCIÓN

En la tabla 4 se presentan los datos de la resistencia a la tracción y el alargamiento en rotura. La tabla 5 muestra el es-

fuerzo y el alargamiento en el punto de fluencia (%) a los 8 años de la colocación para los polietilenos de alta y media densidad. El punto de fluencia no es perceptible en los polietilenos de baja y muy baja densidad.

3.5. RESISTENCIA DE LA SOLDADURA

Por las características especiales de su escaso espesor las uniones entre láminas de PEBD se han realizado con poli(cloruro de vinilo) autoadhesivo. En los otros casos se ha procedido a la mencionada unión entre paños por los métodos tradicionales, es decir, vía térmica. En la totalidad de las soldaduras ensayadas, la resistencia determinada por el procedimiento de tracción ha conducido a resultados correctos, rompiendo las muestras en el borde o



FIGURA 3. Balsa de Plá Mateos (Alicante) cuya impermeabilización se realizó con polietileno de baja densidad.

Balsa (Material)	Característica	Tiempo de instalación, años									
		0		3		5		6		8	
		L*	T	L	T	L	T	L	T	L	T
Los Cabezos (PEAD)	Resistencia a la tracción, MPa	36,0	31,0	28,0	23,0	31,3	28,5	27,6	29,8	32,3	31,4
	Alargamiento, %	923	705	869	690	808	646	743	601	747	794
El Cerrillo del Libro (PEMBD)	Resistencia a la tracción, MPa	43,3	40,6	37,2	32,5	34,6	34,4	32,3	31,8	32,8	30,2
	Alargamiento, %	756	837	744	892	888	894	824	874	756	895
Plá Mateos (PEBD)	Resistencia a la tracción, MPa	25,5	26,5	21,9	19,6	25,7	15,6	16,4	14,7	16,9	14,5
	Alargamiento, %	484	646	466	590	441	537	404	481	312	586
El Saltadero (PEMD)	Resistencia a la tracción, MPa	24,6	23,3	22,8	19,7	23,1	21,6	20,7	20,2	21,9	21,7
	Alargamiento, %	747	717	688	660	738	649	708	660	718	664

TABLA 4. Evolución de la resistencia a la tracción y alargamiento en rotura en función del tiempo. (*) L representa sentido longitudinal y T transversal.

Balsa (Material)	Característica	Tiempo de instalación, años									
		0		3		5		6		8	
		L*	T	L	T	L	T	L	T	L	T
Los Cabezos (PEAD)	Esfuerzo en el punto de fluencia, MPa	22,0	23,0	22,1	23,0	24,2	23,1	27,6	27,1	23,4	22,8
	Alargamiento en el punto de fluencia, %	13	14	15	14	13	14	13	13	14	14
El Saltadero (PEMD)	Esfuerzo en el punto de fluencia, MPa	9,9	9,9	10,8	10,5	11,3	10,9	10,1	10,4	11,0	10,6
	Alargamiento en el punto de fluencia, %	20	19	18	19	18	20	25	22	61	73

TABLA 5. Evolución del esfuerzo y el alargamiento en el punto de fluencia. (*) L representa sentido longitudinal y T transversal.

Balsa (Material)	Tiempo de instalación, años			
	3	5	6	8
Los Cabezos (PEAD)	1293	1450	1453	1440
El Saltadero (PEMD)	890	865	857	800
El Cerrillo del Libro (PEMBD)	807	–	743	–

TABLA 6. Resistencia de la soldadura por tracción (N/50 mm).

en las proximidades de la soldadura, pero fuera de la unión propiamente dicha (Tabla 6). Cuando el ensayo se realiza por el método de pelado es, asimismo, el PEAD, el que conduce a mejores resultados.

3.6. NEGRO DE HUMO

El contenido en negro de humo ha sido correcto ya que, en todos los casos, estaba comprendido entre el 2 y el 3%. La figura 4 muestra la dispersión del negro de humo de las poliolefinas estudiadas cuya asignación en todos los casos fue inferior a 3, donde cuanto más bajo es el guarismo, mejor es la citada dispersión.

3.7. MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXIÓN Y ELECTRÓNICA DE BARRIDO

La evaluación microscópica de las geomembranas de polietileno se ha efectuado en las condiciones experimentales indicadas en la bibliografía (18-20). Las microfotografías de la observación por microscopia óptica de reflexión (MOR) se han tomado a aumentos de (40x) y (60x) con objeto de ver sus texturas y morfología. La figura 5 representa la cara externa a 60 aumentos de las distintas geomembranas a los ocho años de colocadas en obra. Asimismo, se ha comprobado el estado de las citadas geomembranas a los ocho años de instaladas por microscopia electrónica de barrido o “scanner” a (90x) y (900x) aumentos. La figura 6 muestra el aspecto de los materiales en su cara externa a 900 aumentos.

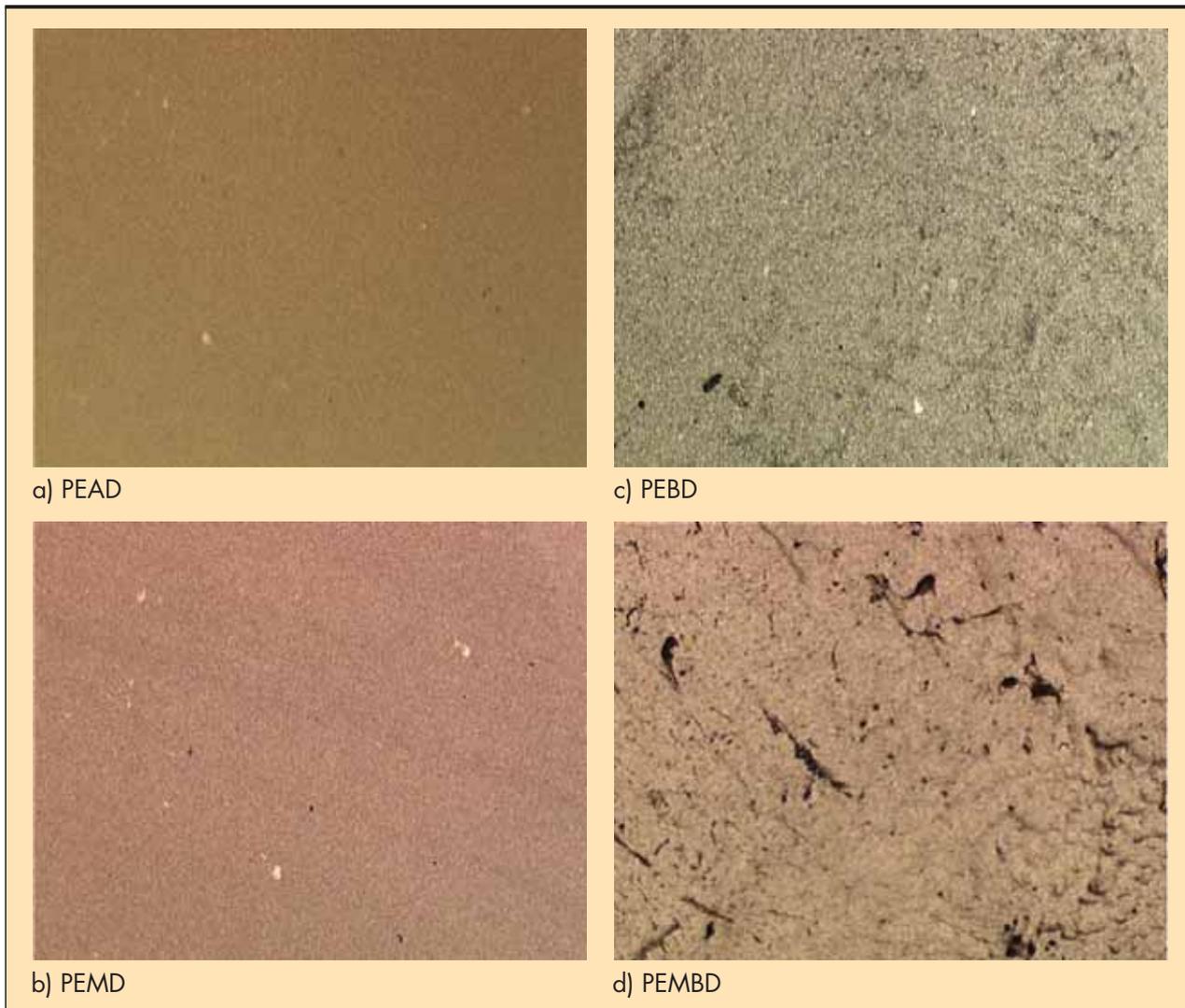


FIGURA 4. Dispersión del negro de humo.

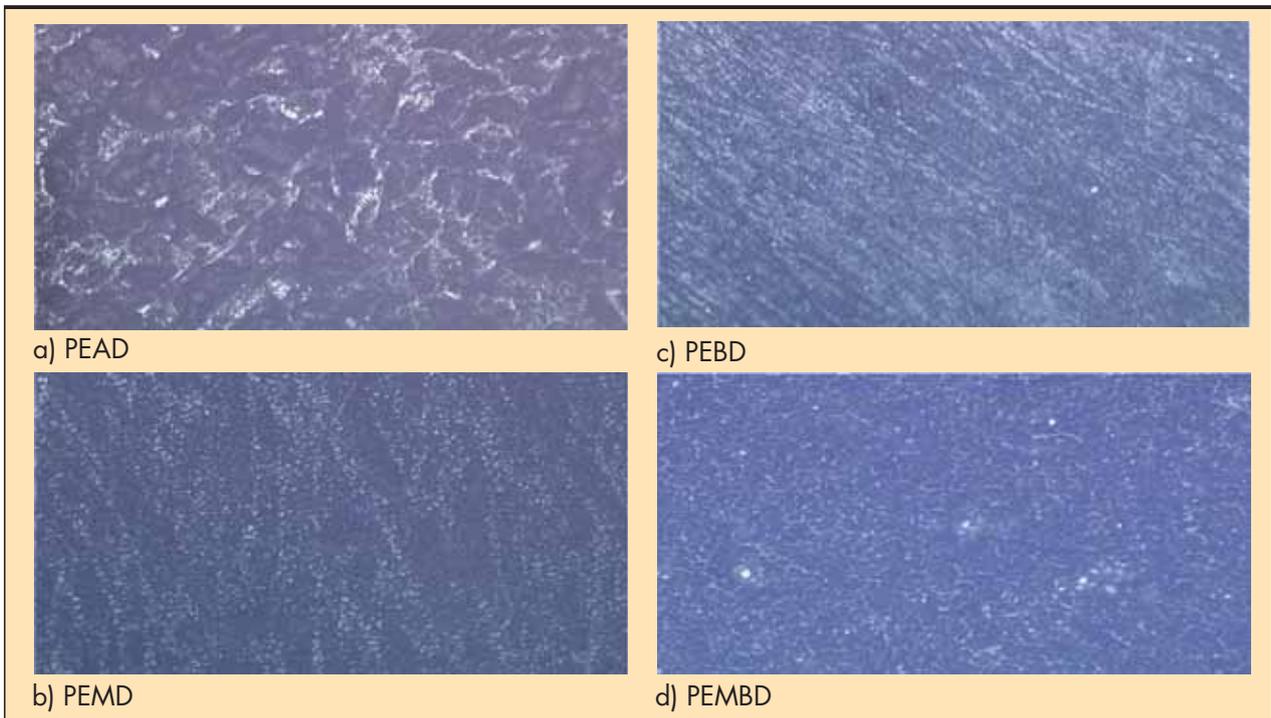


FIGURA 5. Microfotografías (x60) de la cara externa de las geomembranas de polietileno a los ocho años de su instalación por microscopía óptica de reflexión.

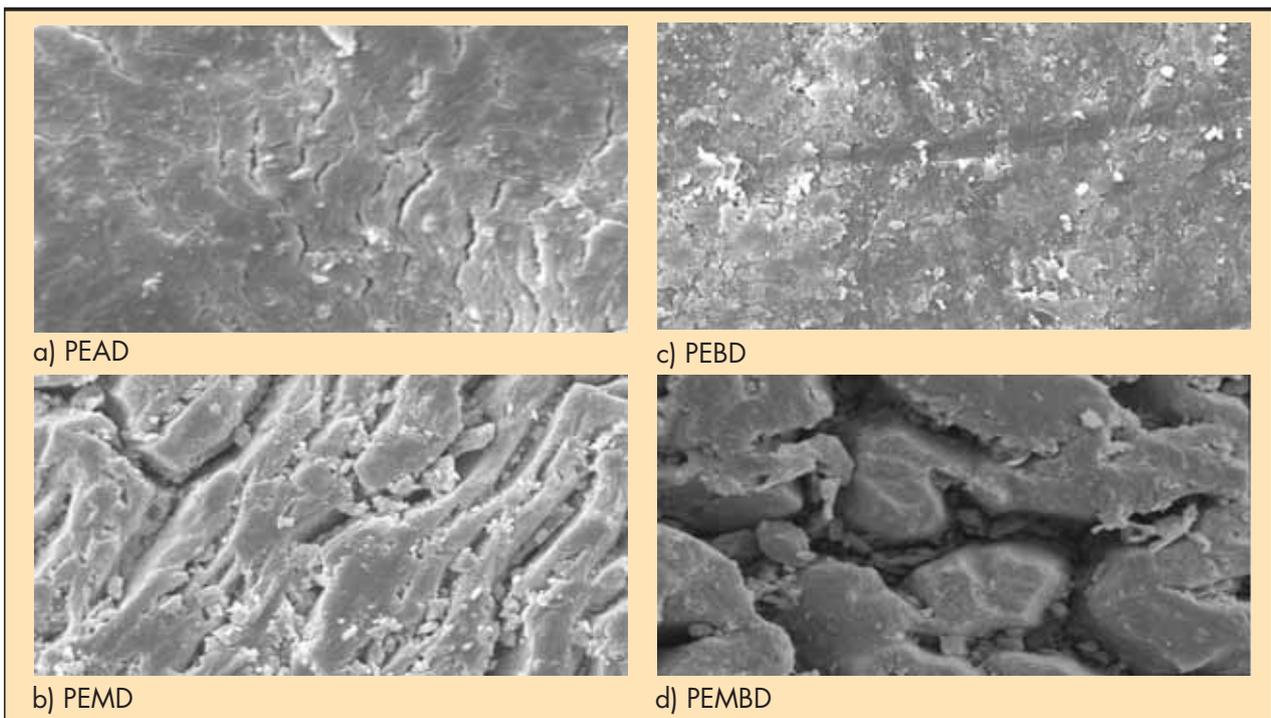


FIGURA 6. Microfotografías (x900) de la cara externa de las geomembranas de polietileno a los ocho años de su instalación por microscopía electrónica de barrido.

4. CONCLUSIONES

1. Los valores de la resistencia al desgarro al cabo de los ocho años de colocadas las láminas en las balsas no han experimentado cambios notables, si bien en los polietilenos de alta y media densidad se han incrementado ligeramente al tiempo que disminuían en los de baja y muy baja densidad.
2. La resistencia a la tracción y el alargamiento en rotura no han variado considerablemente a lo largo de los ocho años de su puesta en obra, se denota, generalmente, una cierta dis-

minución. En el caso de los polietilenos de alta y media densidad, por tener un punto de fluencia bien definido se ha determinado el esfuerzo y el alargamiento en dicho punto, destacando el notable incremento del alargamiento en el PEMD.

3. Las muestras de geomembranas extraídas a lo largo de los ocho años que llevan instaladas, han conducido a resultados correctos al efectuar la prueba de doblado a bajas temperaturas (-75°C), ya que no se han detectado roturas, agrietamientos u otros síntomas de deterioro en la zona de la flexión.
4. La prueba de resistencia mecánica a la percusión o impacto dinámico ha sido superada por las muestras, 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 comprobó al realizar una posterior prueba de estanquidad. No superó la prueba la barrera geosintética de PEBD como consecuencia de su pequeño espesor; no obstante el problema para su empleo en este campo de la Tecnología no es tan grave por que su uso es siempre bajo tierra.
5. La resistencia al punzonamiento o impacto estático presenta unos datos de carga bastante elevados. Pero, lo que determina el buen estado del material es el recorrido del punzón antes de perforar siendo el polietileno de muy baja densidad el de mejor comportamiento; en el extremo opuesto se encuentra el polietileno de alta densidad. Los valores elevados del recorrido en el PEMBD lo hacen muy útil para su empleo sobre taludes o soleras cuya compactación no es la idónea.
6. 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. Los valores más altos son los alcanzados por el PEAD, seguido del PEMD y, por último, el PEMBD. Los resultados numéricos obtenidos son muy altos tanto en tracción como en pelado. Quizás sea el polietileno de alta densidad la geomembrana que alcanza los valores más elevados.
7. En la totalidad de los polietilenos considerados el contenido en negro de carbono ha sido el adecuado. Las fotografías obtenidas en el ensayo para determinar la dispersión del citado aditivo indican que esa dispersión es correcta en todos los casos, pues se les asignó valores inferiores a 3 en la escala 1-7, donde cuanto más bajo sea ese guarismo, mejor es su dispersión.
8. La microscopía óptica de reflexión muestra un buen comportamiento a lo largo de estos ocho años de uso de los distintos tipos de polietileno. La microscopía electrónica de barrido presenta un buen estado de conservación en el caso del PEBD, como consecuencia de su utilización enterrada, fuera del alcance de las radiaciones solares y otros fenómenos de la intemperie. Esta técnica detecta en el resto de las geomembranas un deterioro superficial, fundamentalmente, por la cara en contacto con las radiaciones ultravioleta, siendo más notables las alteraciones en el PEMBD.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. BLANCO, M.-*Geomembranas: constitución, características, seguimiento y normativa*. Curso sobre Proyecto, ejecución y explotación de balsas de materiales sueltos para riego. Universidad Miguel Hernández. Elche (Alicante) (2004).
2. International Commission on Large Dams. *Watertight Geomembranes for Dams. State of the Art*, Bulletin ICOLD N° 78 Paris. (1991).
3. BLANCO, M. y AGUIAR, E. *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. (1998).
4. BLANCO, M.; GUERRA, E. ROMERO, A. SORIANO, J. y ZARAGOZA, G. - *Evolución de geomembranas sintéticas a base de PVC-P, HDPE y EPDM en la impermeabilización de embalses*. Rev. Plast. Modernos 90 (590), 154-162 (2005).
5. BLANCO, M. - *Experiencia española en el empleo de geomembranas en la impermeabilización de balsas*. III Seminario Portugués sobre geosintéticos. Coimbra (Portugal), noviembre (2009).
6. LEIRO, A.; BLANCO, M. y ZARAGOZA, G. *Performance of synthetic geomembranes used in waterproofing of spanish reservoirs*. Geosynthetics 7th ICG, 979-982. Delmas, Gourc & Girard eds. Editorial Balkema pp. 979-982. Rotterdam (Holanda). (2002).
7. BLANCO, M.; ZARAGOZA, G. y AGUIAR, E.- *El seguimiento de geomembranas sintéticas como factor que contribuye a la seguridad y durabilidad de la impermeabilización de embalses*. Ing. Civil, 129, 53-70 (2003).
8. BLANCO, M.; ZARAGOZA, G.; AGUIAR, E.; SORIANO, J.; GONZÁLEZ J. M. y GARCÍA, F. "Materiales sintéticos para impermeabilización de presas y embalses". Proc. II Congreso Nacional de Historia de las Presas. Burgos, octubre (2005).
9. BLANCO, M.; AGUIAR, E.; CEA, J. C. de; CASTILLO, F.; SORIANO, J. y GARCÍA, F.- *Comportamiento de geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD) utilizadas en la impermeabilización de balsas*. Proc. 2º Congreso Nacional de Impermeabilización: Edificación y Obra Pública y 2º Congreso Internacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas, pp. 417-430. Palma de Mallorca. (2008).
10. BLANCO, M.; AGUIAR, E.; CEA, J. C. de; CASTILLO, F. y SORIANO, J.- Estado de las geomembranas sintéticas de polietileno de alta densidad (PEAD) a los siete años de su instalación en balsas. Ing. Civil, 151, 49-60 (2008).
11. KOERNER, R. M. - *Designing with Geomembranes*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, 292, 4th edition. (1999).
12. HSUAN, Y. G. y KOERNER, R. M. - *Long term durability of HDPE geomembrane: Part I-depletion of antioxidant*. GRI Report 16, 36p. (1995).
13. ROWE, R. K. y SANGAM, H.P.- *Durability of HDPE geomembranes*. Geotextiles and Geomembranes 20, 77-95. (2002).
14. HSUAN, Y. G. y KOERNER, R. M. - *Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 532-541. (1998).
15. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. *Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas* (en prensa) (2010).
16. BLANCO, M. *Geomembranas*. I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Sevilla. (2005).
17. BLANCO, M.; CUEVAS, A.; CASTILLO, F. y AGUIAR, E.- *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 (1996).
18. BLANCO, M.; SORIANO, J. ; AGUIAR, E. y ZARAGOZA, G. *Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses*. Ing. Civil 127, 51-59. (2002).
19. SORIANO, J.; BLANCO, M.; BURGOS, J.; AGUIAR, E.; ZARAGOZA, G. y GARCÍA, M. A.- *Las microscopías óptica de reflexión y electrónica de barrido como técnicas avanzadas en el conocimiento del estado de las geomembranas sintéticas*. I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas. Sevilla. (2005).
20. SORIANO, J.; BLANCO, M.; AGUIAR, E. y CEA, J. C. de. *Las técnicas de microscopía óptica de reflexión y electrónica de barrido en el conocimiento del estado de las geomembranas sintéticas*. Ing. Civil, 143, 17-22 (2006).