

Las geomembranas sintéticas poliméricas en la impermeabilización de balsas en el Reino de Marruecos

Polymeric synthetic geomembranes in reservoirs waterproofing in the Kingdom of Morocco

Manuel Blanco Fernández^{1*}

Palabras clave

geomembrana;
impermeabilización;
embalses;
materiales;

Resumen

Este artículo tiene por objeto presentar las geomembranas sintéticas que pueden utilizarse como pantallas impermeables en balsas ubicadas en el Reino de Marruecos. Se hace mención a los materiales empleados en su formulación, resinas y aditivos, así como la normativa existente sobre las mismas. Para terminar, se indica la necesidad de llevar a cabo un seguimiento periódico para conocer su estado de conservación y el momento que se hace preciso proceder a una reimpermeabilización.

Se citan las características a determinar en dicho control periódico y que hacen referencia a resistencia a la tracción y alargamiento, resistencia al desgarro, resistencia al impacto, resistencia al punzonamiento, doblado a bajas temperaturas, dureza Shore, resistencia al agrietamiento por esfuerzos medioambientales, tiempo de inducción a la oxidación, resistencia de la soldadura tanto por tracción como por pelado, contenido y dispersión de negro de carbono, microscopía óptica de reflexión y microscopía electrónica de barrido.

Keywords

geomembrane;
waterproofing;
reservoirs;
materials;

Abstract

This essay aims to address some of the aspects related to polymeric synthetic geomembranes that could be used in reservoirs of water located in the Kingdom of Morocco. In this regard, it offers a description of the two basic components geomembranes consist of, that is, resins and additives. It also gives an overview of the key pieces of legislation affecting such an issue.

Furthermore, it stresses the paramount importance of implementing monitoring procedures in order to assess the condition of geomembranes over time and, if necessary, to proceed to provide for new waterproofing.

Lastly, the characteristics of the process monitoring aforementioned are detailed in terms of tensile strength, elongation, tear resistance, dynamic impact, puncture resistance, low-temperature folding, Shore hardness, stress cracking, oxidation induction times, joint strength -shear and peeling test-, content and dispersion of carbon black, and reflection-optical and scanning-electron microscopy.

1. INTRODUCCIÓN

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) inició, en el año 1989, un largo camino de colaboración con la Comunidad Autónoma de Canarias en el tema de geomembranas impermeabilizantes utilizadas en balsas. Posteriormente, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente estableció una serie de encomiendas para conocer el estado de las balsas impermeabilizadas con geomembranas en todo el territorio español; el control abarcó a más de 200 estructuras hidráulicas, donde se toman muestras de geosintéticos, periódicamente, para determinar el momento en que se hace necesario una reimpermeabilización que evite daños materiales e incremente la seguridad de la balsa.

Fruto de estas investigaciones y en el año 2010, el CEDEX elaboró a petición de la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente el **Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas** que resulta de gran

interés para aquéllos que han de utilizar la técnica de aplicación de geomembranas sintéticas en la impermeabilización de balsas.

Las condiciones medio ambientales de las áreas geográficas españolas, antes mencionadas, son similares a las del Norte de Marruecos. Las radiaciones UV son elevadas en ambas zonas como se puede comprobar en la figura 1 (Bournay, E. & UNEP/GRID Arendal, 2007).

Este trabajo se ha estructurado de la siguiente forma:

- Estudio de balsas en general
- La impermeabilización con geomembranas.
- Tipología de balsas con especial atención a balsas cubiertas que conseguirían disminuir, de manera notable, la evaporación en depósitos situados en el Reino de Marruecos.
- Materiales utilizados
- Normativa
- Comportamiento a largo plazo
 - Toma de muestras
 - Probetarios
 - Pruebas experimentales

* Autor de contacto: mblanco@cedex.es

¹ Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Madrid, España.

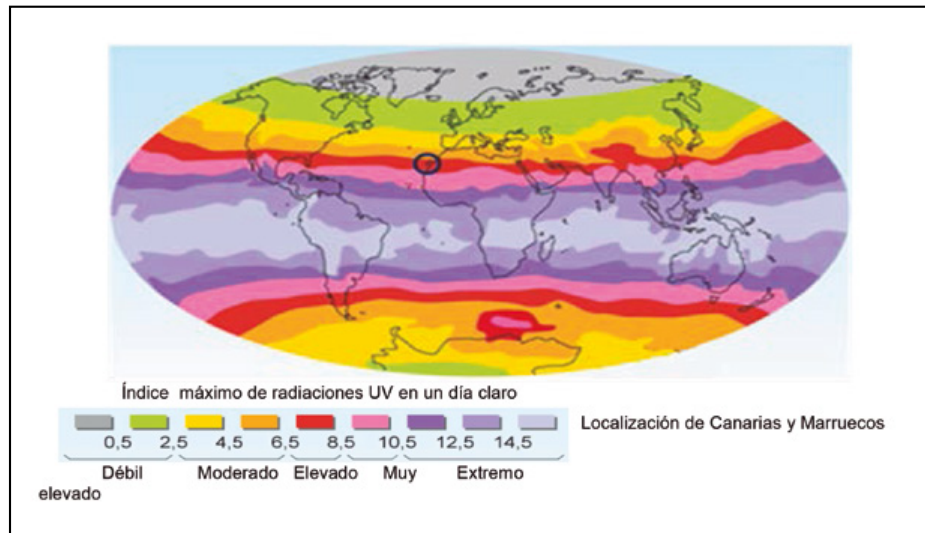


Figura 1. Índice máximo de radiaciones UV en un día claro.

- Seguimiento a lo largo del tiempo y control periódico de las geomembranas instaladas en las balsas

2. LAS BALSAS

Se entiende por balsa toda estructura artificial destinada al almacenamiento de agua, situada fuera de un cauce y del dominio público hidráulico y delimitada total o parcialmente por un dique de cierre.

Las balsas de almacenamiento de agua se diferencian de las presas principalmente en que no están proyectadas para regular aguas de escorrentía y, por lo tanto, no cierran propiamente una cuenca de aportación.

Las actuales balsas tienen sus humildes antecedentes en las albercas de los huertos familiares, pequeños depósitos de 20-100 m³, cuya misión básica era adaptar el ritmo de caudales entrantes al ritmo adecuado para regar el huerto, así como poder elegir el momento adecuado para hacerlo.

Una característica esencial de las balsas es que se construyen en el sitio que se necesitan, sean las que sean las condiciones geotécnicas del lugar. Hasta la aparición de las láminas poliméricas impermeables en el año 1959, los

procedimientos eran los muros de mampostería y las tierras arcillosas. Los primeros eran una limitación obvia por su coste y la solución arcillosa limitaba los lugares en los que era viable utilizarla, que podían o no ser los necesarios.

Por otra parte, la extensión del regadío exigía mayores volúmenes regulados y los nuevos métodos de riego, mayor garantía diaria de suministro. La impermeabilización con geomembranas permitió resolver estas cuestiones. La balsa pasó a ser una excavación en cualquier terreno cuya capacidad se aumentaba con diques construidos con el material escavado, compensando volúmenes y se impermeabilizaba con una lámina polimérica a veces de unas décimas de milímetro de espesor, como es el caso de la figura 2 donde se presenta la balsa de Plá Mateos, en el municipio de Alicante.

Se construyeron miles de balsas con un resultado global francamente bueno, muy pocas fallaron y las que lo hicieron no dieron lugar a daños graves. Una explicación plausible de este buen comportamiento se encuentra básicamente en la impermeabilidad de las láminas y en su gran deformación en rotura. La primera mantiene seco el entorno del vaso y los diques, y la segunda impide la rotura de la lámina aún con deformaciones importantes y asientos diferenciales notables.



Figura 2. Balsa de Plá Mateos, impermeabilizada con polietileno de baja densidad (PEBD).

Desde hace ya unos años, no solamente hace falta regular los caudales afluentes en una o dos semanas antes de regar, a su vez es necesario almacenar el agua para el final de la primavera y verano. Esta cuestión ha originado balsas de mayor capacidad (varios hm³) con calados superiores a los 15 m. Es decir, las circunstancias actuales han cambiado respecto a las balsas de hace un par de decenios.

Como la mayoría de estos depósitos de agua están en zonas cuyo soporte no es lo suficientemente impermeable, es necesario recurrir a una **impermeabilización** del mismo. Aunque la estanquidad se puede conseguir utilizando distintos tipos de pantallas (geomembranas, material asfáltico u hormigón), la solución más habitual es el empleo de geomembranas sintéticas poliméricas, llamadas también barreras geosintéticas poliméricas (GBR-P).

3. LA IMPERMEABILIZACIÓN

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). 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 llegado 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. Antes de 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 cómo se encontraba al cabo de los años y, tras los ensayos pertinentes, se comprobó su perfecto estado de conservación (Blanco y Zaragoza, 2003). A principios de los setenta se impermeabiliza el azud de Matavacas (Sanlúcar de Guadiana-Huelva) con una geomembrana sintética de **caucho butilo** (IIR) que aún permanece con buenas características salvo las uniones entre paños (de Cea et al. 2002, Blanco et al. 2010). Estos inicios en el uso de las barreras geosintéticas poliméricas con la utilización de caucho butilo coincide con lo que se estaba realizando en el resto del mundo, pues según datos del Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD) en su Boletín n° 78 del año 1991, la primera balsa impermeabilizada con una geomembrana sintética fue la de Kualapuu, en Molokai (Hawái) y tuvo lugar en el año 1969; el material empleado era, asimismo, caucho butilo (Blanco 2012).

Los dobles enlaces, “ σ ” y “ π ”, 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 “ π ” y por ello deteriorar a la geomembrana.

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. Varios factores han influido en su introducción en nuestro país, pero quizás el más decisivo fue que estas geomembranas no eran atacadas por el ozono atmosférico, causa principal de la degradación del butilo, ya que en la estructura del polímero solo hay enlaces “ σ ” que no son vulnerables a reactivos electrófilos como era el ozono.

No obstante, no todo eran ventajas en la geomembrana de poli (cloruro de vinilo) plastificado, pues la pérdida de plastificantes degradaba el material de una forma considerable.

Los posibles fallos de las anteriores láminas, favorecieron 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).

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 fuera de la cadena principal, no es atacado por el ozono atmosférico.

4. TIPOLOGÍA DE BALSAS

Las pérdidas de agua por evaporación en balsas normales es un problema que en zonas áridas de Estados Unidos, Australia, Israel y gran parte de la cuenca del Mediterráneo, donde nos encontramos, puede ser de notable importancia tanto desde el punto de vista medioambiental como económico (Martínez & Baille 2009,). Estudios realizados en la década de los 90 en el Campo de Dalías (Almería) cifran las pérdidas por evaporación en un 17% del total de pérdidas de agua en la actividad agrícola (Bengoechea et al. 1991). Para la cuenca del Segura, el desarrollo y validación de un modelo regional de evaporación estima que las pérdidas anuales por evaporación son del orden de 60 hm³, lo que supone más del 8% de los recursos hídricos destinados al riego. En ciertas zonas de Australia la evaporación en embalses agrícolas era del orden de 1000 hm³ que suponía un 40% de la capacidad de almacenamiento disponible. (Brown 1988, Finn & Barnes 2002,.) En el año 2006, esas pérdidas en Turquía representaban el 20% del agua disponible (Gökbülak & Ozhan 2006).

Este hecho ha conducido a la aparición de otros tipos de balsas que obviarían este fenómeno.

4.1. Balsas comunes

Son aquellos depósitos donde el agua se encuentra en contacto con la intemperie. (figura 3). Este tipo de balsas es la más corriente, en ellas la lámina impermeable se encuentra cubierta por el agua, en unas zonas y a la intemperie, en otras. El calor y las radiaciones UV procedentes del sol deterioran con el tiempo a la geomembrana sintética en detrimento de su durabilidad. Por otro lado, la evaporación del agua es muy elevada.



Figura 3. Balsa de la Nava de Arévalo, impermeabilizada con PEAD.

4.2. Balsas de cubierta flotante

La cubierta flotante es un sistema continuo que consiste en una membrana flexible impermeable que flota sobre el agua. Normalmente estos productos cubren el 100% de la superficie, reducen e incluso impiden los intercambios de masa y energía entre la interfase agua-atmósfera y, por tanto, son uno de los sistemas utilizados para reducir la evaporación.

Los primeros materiales utilizados fueron el caucho butilo (IIR), el caucho terpolímero de etileno-propileno-monomero diénico (EPDM) y, en menor número, el poli (cloruro de vinilo) plastificado (PVC-P). Desde entonces el diseño, materiales y condiciones de puesta en obra han sufrido continuas mejoras. Como resultado, esta tipología de cubrición cuenta con bastantes instalaciones alrededor del mundo. Generalmente se instalan en balsas de pequeña capacidad. La mayoría de las instalaciones utilizan láminas termoplásticas, frecuentemente, reforzadas con tejido de hilos sintéticos. Según la naturaleza de la resina empleada

en su formulación las características mecánicas específicas de la geomembrana condicionarán sus métodos de aplicación y reparación.

En contraposición a su alta eficiencia en reducir la evaporación, las desventajas principales de este tipo de balsa radican en sus altos costes, tanto de ejecución como de mantenimiento (daño potencial debido al viento y tormentas) y su dificultad de instalación en balsas de gran tamaño.

En España las primeras referencias datan de principios de los años 90. En 1993 se realiza una cubierta flotante a base de polietileno clorosulfonado (CSM) en un depósito de agua potable de 40.000 m³ en Iznájar (Córdoba). En el año 1996 se construye en Roquetas de Mar (Almería) una balsa cubierta de mayor capacidad, 100.000 m³, se trata de la balsa de Aguadulce para abastecimiento de agua potable a la ciudad de Almería. Se utilizó de nuevo CSM y se emplearon 15.728 m². Otros depósitos como el de Los Cardones en la isla de La Gomera han sido realizados, posteriormente, con polipropileno (PP) (figura 4). Se



Figura 4. Depósito de Los Cardones con cubierta flotante de PP, en Alajeró, isla de La Gomera.

usan, para el almacenamiento de purines, lixiviados y, fundamentalmente, agua para consumo humano.

Una novedad en este tipo de balsas es la colocación de módulos fotovoltaicos sobre la cubierta; esta técnica comenzó en Japón en el año 2007 y se ha extendido por todo el mundo. En España se instaló en el año 2007 en una balsa en Agost, en la provincia de Alicante. En Japón se generan por este tipo de balsas 3 Mw. (Pons 2015).

4.3. Balsas cubiertas

La construcción de este tipo de balsas en nuestro país se empezó en el año 1975, donde se empleaban láminas reforzadas sobre estructuras de cables de acero y se obtenían tasas de disminución de la evaporación elevadas. En la isla de Gran Canaria se construyen varias de este tipo. Pero la acción adversa del viento y la acumulación de agua o grnizo generaraban algunos problemas, por ello en años posteriores, se han empleado mallas de sombreo ligeras de polietileno y polipropileno que tratan de paliar los efectos

adversos del viento mediante el entrelazado de sucesivas retículas de cables con la malla textil. Asimismo, un cierre perimetral impide la circulación de viento en el espacio intermedio cubierta-superficie del agua.

La cubrición de la balsa presentaba otras ventajas como era la no proliferación de algas por no estar el agua expuesta al sol, permitir el almacenamiento de aguas depuradas debido a la estructura de la malla de sombreo, mejorar la calidad del agua almacenada al retener la malla de sombreo gran parte de la suciedad y polvo que la rodea, evitar la acumulación de todo tipo de objetos arrojados sobre las balsas comunes con la geomembrana impermeable a la intemperie, aumentar la durabilidad de la geomembrana como consecuencia de la no incidencia sobre la misma de las radiaciones solares y, fundamentalmente, disminuir notablemente la evaporación (Finn & Barnes 2007, Martínez et al 2008, Redón, M. 2011).

Esta técnica es la que mayor profusión ha experimentado en España en los últimos años; su desarrollo se fundamenta en una extensión práctica de la tecnología



Figura 5. Balsa cubierta de La Montaña del Tesoro, impermeabilizada con PEAD.



Figura 6. Balsa cubierta de Ravelo, impermeabilizada con EPDM.

de construcción de invernaderos tipo “parral” del litoral mediterráneo. Las experiencias prácticas se concentran en el Levante español y en las Islas Canarias. Las primeras balsas se llevaron a cabo en Almería, como es el caso de los embalses de la Rambla de Carcáuz en La Mojonera. De ahí la técnica mejorada, empleando mallas de sombreo de polietileno y cordones de poliamida para sustentarla, pasó a las Islas Canarias donde encontramos un gran número de balsas de este tipo en distintas islas: Los Corralillos en Gran Canaria, La Montaña del Tesoro en El Hierro (figura 5) y Ravelo (figura 6), Valle de San Lorenzo y El Saltadero en la isla de Tenerife (Renz 2005) (figura 7).

5. MATERIALES

El término geomembrana fue acuñado por el Dr. Giroud en el Coloquio Internacional sobre el Empleo de Textiles en Aplicaciones Geotécnicas celebrado en París en el año 1977. De esta forma se daba fin a una serie de acepciones más o menos imprecisas como láminas de impermeabilización o membranas flexibles (Zanzinger 2007).

Una geomembrana está constituida por una resina o material geosintético y unos aditivos; la resina es la que le confiere el nombre.

5.1. Resinas

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 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
- Poliolefina elastomérica, POE
- Poliolefina termoplástica, TPO

Las geomembranas más utilizadas son PVC-P, PEAD y EPDM.



Figura 7. Balsa cubierta de El Saltadero, impermeabilizada con PVC-P.

Tabla 1. Materiales sintéticos para la impermeabilización con geomembranas

Nomenclatura	Material básico	Tipo
ECB	Copolímeros de acrilatos/etileno y betún	I
EVA/C	Copolímeros de acetato de vinilo y etileno	
PE	Poliétileno	
PEC	Poliétileno clorado	
PP	Polipropileno	
PIB	Poliisobutileno	
PVC-P	Poli(cloruro de vinilo) plastificado	II
TPO	Polioléfina termoplástica	
E/P	Copolímeros de etileno/propileno	II
CSM	Poliétileno clorosulfonado	
CR	Caucho de cloropreno	III
EPDM	Caucho terpolímero de etileno/propileno/ monómero diénico	
IIR	Caucho butilo	
NBR	Caucho de acrilonitrilo/butadieno	
POE	Polioléfina elastomérica	

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

Es un material rígido, incoloro, de limitada estabilidad frente al calor. Los estudios de rayos X indican que el PVC obtenido por los distintos procesos comerciales es sustancialmente amorfo con pequeñas cantidades de cristalinidad (alrededor del 5 % medido por técnicas de difracción de rayos X). Estas zonas cristalinas son de estructura sindiotáctica, por lo que al PVC se le considera un polímero atáctico con pequeños segmentos sindiotácticos.

La presencia de átomos de cloro hace aumentar la atracción entre las cadenas, incrementando así la dureza del polímero. Cuando se calienta a temperaturas superiores a 70°C se producen una serie de factores adversos y a 150-200°C el polímero se degrada, pierde ácido clorhídrico y se obtienen estructuras poliénicas.

Su parámetro de solubilidad es aproximadamente 9,5 y el polímero es difícil de disolver en sustancias no polares de bajo parámetro de solubilidad. Se disuelve bien en ciclohexanona y tetrahidrofurano, sustancias que se emplean, por ello, para la unión entre paños.

La soldadura entre paños puede realizarse de diversas formas, en lo que atañe a obra, las de uso común son los disolventes y el aire caliente. Cualquiera de ellas conduce a uniones que no suelen presentar problemas. Por otro lado, presenta una ventaja adicional puesto que no se precisa la presencia de grandes especialistas para hacer un parche o soldar una parte del material.

5.1.2. Polietileno de alta densidad (PEAD)

El polietileno es la poliolefina más sencilla. Su macromolécula es lineal, 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, caso de n-olefinas tales como n-buteno, n-hexeno y n-octeno (copolímero).

Las poliolefinas presentan 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, podría reaccionar homolíticamente, vía radicales libres.

Sus características mecánicas son excelentes, superando en resistencia a la tracción y alargamiento a la mayoría de los materiales empleados en la impermeabilización de embalses. El polietileno de alta densidad es un material que presenta un punto de fluencia bien definido, y sus características mecánicas deben referirse tanto a él como al punto de rotura.

Se ha comprobado, como era de esperar, la influencia negativa que tienen las radiaciones solares sobre las láminas de polietileno de alta densidad. Se ha detectado un deterioro del material en zonas de fuertes radiaciones solares, tanto mayor cuanto menor era el espesor de la lámina. Por lo que, se recomienda geomembranas de espesores superiores a 2 mm y, en ningún caso, inferiores a 1,5 mm. Estos espesores, además, evitarían problemas en las proximidades de la soldadura, desgarros, pérdidas notables de propiedades mecánicas y punzonamientos.

Otra problemática del material observada hasta el momento ha sido la relacionada con su puesta en obra, desde la hora de la instalación hasta la forma de llevar a cabo la unión entre láminas. La naturaleza termoplástica del material hace recomendable su colocación en horas de no excesivo calor. El área próxima a la soldadura, como en todo material, es una zona débil y que sería recomendable evaluar y seguir su comportamiento con una cierta frecuencia.

5.1.3. Caucho terpolímero de etileno-propileno-monómero diénico /EPDM)

Este caucho terpolímero está formado por tres monómeros: etileno, propileno y un dieno. El etileno y el propileno constituyen la cadena principal y se pueden considerar un copolímero en bloque. Al producirse la polimerización desaparecen los dobles enlaces de ambos monómeros por romperse sus enlaces π y al solo tener enlaces σ la cadena es totalmente saturada como si se tratase de un alcano. Los monómeros etileno y propileno se encuentran en distintas proporciones, siendo superior la del etileno que la del propileno.

Los dienos que se están empleando, en la actualidad, son el 1,4-hexadieno de cadena lineal y, fundamentalmente, productos cíclicos como el diclopentadieno (tríciclo[5,2,1,0^{2,6}]-3,8-decadieno), 5-vinil-2-norborneno (5-vinilbíciclo[2,2,1]-2-hepteno) y 5-etiliden-2-norborneno (5-etilidenbíciclo[2,2,1]-2-hepteno). El dieno constituye la cadena secundaria y cuelga de la principal, por lo que consideraría de monómero de injerto. La unión a la cadena macromolecular principal tiene lugar por uno de los dobles enlaces, quedando el otro libre, que al estar en pequeñas proporciones y además en la cadena secundaria no se vería demasiado afectado por la acción del ozono. Por otro lado, ese doble enlace libre es el responsable de la vulcanización o reticulación del material (Noval 2015).

No obstante, hay que ser prudente durante la realización de la obra pues su resistencia al impacto dinámico es baja y su resistencia al desgarro es menor que en otro tipo de polímeros. En cambio, su resistencia al punzonamiento estático o perforación es excelente.

5.2. Aditivos

Son aquellos productos que acompañan a las resinas en la formulación de una geomembrana, cambiando notablemente sus propiedades.

Aunque existen una gran variedad de aditivos solo se hará referencia a los de mayor interés desde este punto de vista:

- Cargas
- Plastificantes
- Antienvejecimiento
- Agentes ignífugos o pirorretardadores
- Agentes de entrecruzamiento
- Fungicidas
- Pigmentos

Las **cargas** son aditivos sólidos que se incorporan al polímero para modificar sus propiedades físicas, especialmente, mecánicas. Suelen dividirse en dos tipos: inertes y reforzantes. Las consideradas cargas inertes, como carbonato cálcico, barita, talco, caolín, no son tal pues suelen afectar a algunas propiedades; su acción dependerá del tamaño de la partícula incorporada, de su forma, de su naturaleza química e impurezas que la acompañan.

Los **plastificantes** son sustancias normalmente líquidas que añadidas a un material plástico aumentan su flexibilidad. Los productos comúnmente empleados con este fin suelen ser ésteres de elevado peso molecular. La pérdida de estos plastificantes, conduce a la geomembrana a una degradación progresiva.

Los **aditivos antienvejecimiento** son, principalmente, los citados a continuación:

- **Antioxidantes** para evitar, en lo posible, la degradación de la cadena del polímero que se rompe por calor y las radiaciones solares.
- **Antiozonizantes** que previenen la degradación de ciertos cauchos, fundamentalmente cuando están sometidas a tensión.
- **Estabilizadores contra la deshidrocloración** que retardan la pérdida de ácido clorhídrico en materiales clorados.
- **Absorbentes de luz UV** que evitan la reacción en cadena de degradación de la macromolécula provocada por las radiaciones solares. De todos ellos, uno de los más utilizados es el negro de carbono.

Los agentes **ignífugos o pirorretardadores** son aquellas sustancias que en pequeñas cantidades disminuyen o retrasan su carácter inflamable. Las geomembranas que se utilizan en la impermeabilización de balsas en las que puede haber un riesgo de incendio deben ser, al menos, autoextinguibles.

Otros productos empleados como aditivos son los **fungicidas** que incorporados a las resinas previenen del ataque por hongos a las láminas. Los **pigmentos** son aquellas sustancias sólidas que confieren color y opacidad a la lámina.

5.3. Tipos de geomembranas

Las geomembranas para impermeabilización se suelen clasificar o presentar de cuatro formas distintas:

- **Homogéneas**, constituidas, exclusivamente, por el material polimérico y los aditivos correspondientes.
- **Reforzadas**, cuando el material macromolecular lleva inserciones de fibras, velos o tejidos. Los materiales de refuerzo, comúnmente utilizados para estos fines, son la fibra de vidrio y los hilos sintéticos, fundamentalmente hilos de poliéster. Dependiendo del tipo de refuerzo se puede mejorar una propiedad determinada para un uso particular. En unos casos, la misión principal de esta inserción es la mejora de las propiedades mecánicas; en otros, la estabilidad dimensional de la lámina.
- **Revestidas** con velos, tejidos, u otros refuerzos, para evitar la aparición de tensiones del proceso de fabricación y/o para reforzar la resistencia mecánica.
- **Multicapa**, formadas como su nombre indica, por una serie de capas, del mismo o de distintos materiales. De este modo, se puede conseguir mejorar las propiedades mecánicas, antirretracción, protección ultravioleta. Es corriente en láminas de poli(cloruro de vinilo) plastificado reforzado con tejido de hilos sintéticos, observar dos colores distintos en la lámina, la capa externa suele llevar abundancia de aditivos para la protección ultravioleta y la interna más fungicidas para incrementar la resistencia a los microorganismos.

6. NORMATIVA

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 en los estados de la Unión Europea y los del Espacio Europeo que son los de la antigua Asociación Europea de Libre Comercio (EFTA), además de Turquía y Macedonia. 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 (2010) 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.

7. SEGUIMIENTO

Las características de las barreras geosintéticas poliméricas se determinarán 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 a emplear es la citada en la normativa señalada en el epígrafe 6.

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 (Blanco et al. 2012). Complicada se presentó la tarea de dirimir 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. 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
- Dureza Shore
- Resistencia al agrietamiento por esfuerzos medioambientales (“stress cracking”)
- Tiempo de inducción a la oxidación
- Microscopia óptica
- Microscopia electrónica de barrido

El conocimiento del comportamiento a lo largo del tiempo de estos materiales se consigue con un control periódico para lo cual se deben realizar visitas de inspección a las balsas y procederse a la correspondiente toma de muestras.

7.1. Toma de muestras

¿Cuál sería el lugar idóneo de extracción de material para un ensayo de control? Por regla general, siempre del talud norte (orientación al sur en el hemisferio norte) y en el área de coronación, ya que es el lugar donde las radiaciones UV procedentes del sol deterioran en mayor medida al material sintético. Cuando el embalse está lleno se puede, además, hacer una extracción en la zona sur para establecer una comparación que, posiblemente, será de gran interés. En otras ocasiones, es recomendable elegir muestras de la zona intermedia o de intermitencias e incluso del área que está siempre cubierta por el agua, ya que, aunque no es el caso más frecuente, hay algunos materiales que sufren una degradación mayor por el agua que por el sol. En cualquier caso si se observa un tipo de patología en una zona determinada es allí a donde habrá que dirigirse para tomar la muestra correspondiente. No deberá olvidarse de efectuar una extracción en zona de soldadura, por la importancia que tiene la unión entre paños y los fallos que suelen suceder en sus proximidades.

Otro problema que se tuvo que dilucidar era el tiempo idóneo para la extracción de muestras y la frecuencia. En cuanto a la época del año apropiada depende,

Tabla 2. Requerimientos exigidos a una geomembrana sintética homogénea

Característica	Material												
	PVC-P												
	EVA/C	PEAD	PELBD	PEMBD	PEC	PVC-Ph	f _v	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	500	500	500	500	500	500	500	500	300	300	300	500	500
- Altura del percutor, mm, mín.													
Resistencia al punzonamiento:	50	8	-	45	25	20	20	25	30	30	30	25	30
- Recorrido del percutor, mm, mín.													
Contenido en negro de humo, %	-	2,0-3,0	2,0-3,0	2,0-3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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

Característica	Material			
	PVC-P	CSM	PP	PEMBD
Resistencia a la tracción, N/50 mm, mín.	1100	1100	1100	1000
Alargamiento en el punto de carga máxima, %, mín.			15	
Doblado a bajas temperaturas (-20°C)	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

fundamentalmente, del uso que se vaya a hacer del agua, porque conviene que el embalse se encuentre parcialmente vacío en ocasiones, para comprobar el estado de la geomembrana en su totalidad. En cuanto a la segunda cuestión planteada, esto es, la frecuencia de toma de muestras se comenzó en Canarias haciendo controles semestrales y los resultados fueron excelentes. Pero visto a distancia, se podría efectuar de una forma anual; en este punto las normas españolas ya hablan del tema y hacen las correspondientes recomendaciones. De todos modos, hay que tener en cuenta el estado de la geomembrana y el tiempo que lleva instalada; un buen producto colocado recientemente no debería ser motivo de una toma de muestras prematura; ahora bien láminas que llevan instaladas más tiempo que el de su vida útil necesitarían una vigilancia especial desde el punto de vista de control.

La realización de las pruebas de seguimiento hace necesario la toma de muestras de una forma periódica. Dicha extracción de material debe realizarse con cuidado y restituir con un parche la zona afectada, pues se trata de un ensayo destructivo. La cantidad de material a extraer debe ser del orden de 40x30 cm además de la suficiente superficie de la zona de unión entre paños. En cualquier caso la mínima posible para deteriorar al sistema impermeabilizante pero la necesaria para poner de manifiesto cuál es su estado.

7.1.1. Probetarios

Los ensayos para conocer el estado de los geosintéticos en cada momento son de tipo destructivo, por lo que es necesario introducir un parche en el sistema impermeable (figura 8) y con el fin de deteriorar lo menos posible a la geomembrana, fundamentalmente, en los primeros años y hacer, incluso, más económico el proceso de toma de muestras se recomienda la colocación de unos probetarios del mismo material soldados a la lámina principal. Dichos probetarios deberán llevar la soldadura correspondiente hecha en el momento de la instalación, tal y como se indica en la figura 9.

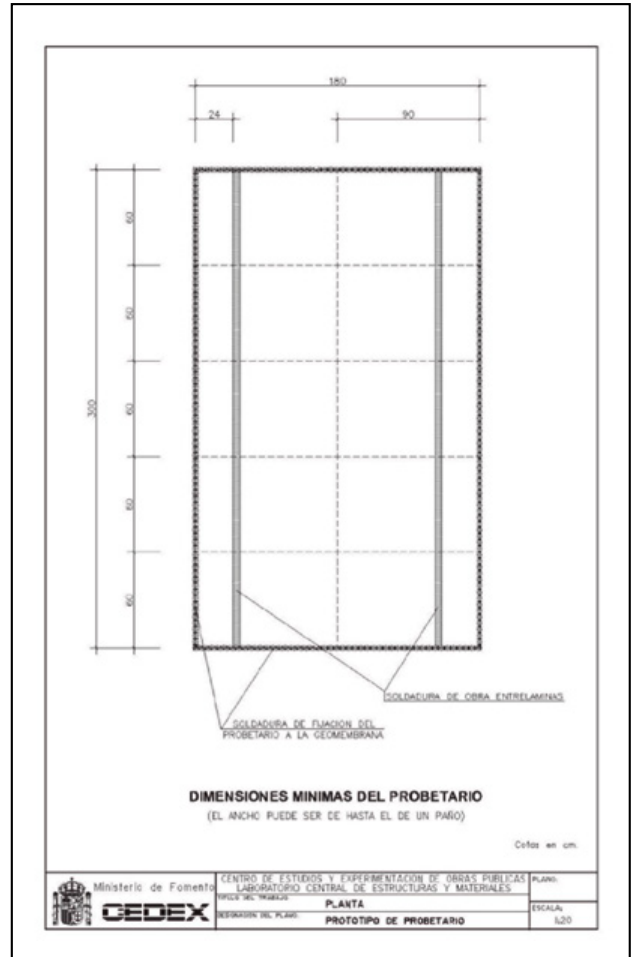


Figura 9. Dimensiones mínimas de un probetario.

¿Dónde y cuantos probetarios se deben colocar? El número de ellos es función de la capacidad de la balsa. Si es muy pequeña quizás que con uno podría ser suficiente. En balsas de cierta entidad habría que colocarlos en la dirección de los cuatro puntos cardinales, tanto en zonas de coronación, intermedias y próximas al agua, así como en la solera.



Figura 8. Zona de extracción de muestras en la zona norte de coronación de la geomembrana de PVC-P de la balsa de La Florida (Icod de los Vinos-Tenerife).

Se puede preguntar si los resultados obtenidos en los mencionados probetarios son los mismos que los alcanzados con las muestras extraídas de la geomembrana que forma parte del sistema impermeabilizante. La contestación es que los datos obtenidos experimentalmente son bastante aproximados, si bien no son exactamente iguales debido a que las tensiones y procesos de expansión-retracción, especialmente notables en los termoplásticos, son muy diferentes entre lo que puede soportar la geomembrana y un simple probetario.

8. COMENTARIO FINAL

La degradación de una geomembrana sintética polimérica tiene lugar por la acción del calor y, fundamentalmente, de las radiaciones solares que atacan al material polimérico produciendo radicales libres. Estos radicales libres dan lugar a una serie de reacciones en cadena, de tipo homolítico, que conducen al deterioro rápido del material.

Teniendo en cuenta que el índice máximo de radiaciones UV es similar en España y Marruecos, se puede afirmar que las directrices expuestas en los distintos epígrafes de este trabajo, que son fruto de la experiencia española en este campo de la Tecnología, son totalmente extrapolables a las balsas a construir en el Reino de Marruecos.

9. BIBLIOGRAFÍA

Bengoechea, J. M., Pérez-Cobos, J., Pérez-Parra, J. y López Segura, J. G. (1991). *Evaluación de las pérdidas de agua de riego en el Campo de Dalías, Almería en Symposium sobre el agua en Andalucía*. Córdoba.

Blanco, M. (2012). *Spanish experience in the use of synthetic geomembranes for hydraulic works. Keynote Lecture, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: 7-23 (electronic proceedings) Vol. 1: XXI-XXXIX (printed volumes)*. Valencia, septiembre.

Blanco, M., Castillo, F., García, F., Mateo, B., Solera, R., García, C., de Cea, J. C. y García-Wolfrum, S. (2012). *Monitoring of synthetic geomembranes used for waterproofing in hydraulic works, in Blanco et al. (Eds.) Eurogeo5, Ed. R. B. Servicios Editoriales, S. L.: Vol.2: 64-69. (electronic proceedings). Vol. 1: 274-279 (printed volumes)*. Valencia, septiembre.

Blanco, M., Castillo, F., García, F. y Soriano, J. (2010). *Las geomembranas sintéticas en la rehabilitación y mantenimiento de paramentos de presas. Dam Maintenance and Rehabilitation II. Romeo et al. (eds.) Taylor & Francis Group. 335-341. London*

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 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.*

Bournay E. y UNEP/GRID-Arendal. (2007). *The global solar UV Index. Vital Ozone Graphics, 28.*

Brown, J., A. H. (1988). *The potential for reducing open water evaporation losses, in Hydrology and Water Resources Symposium: 108-115. Camberra (Australia), febrero.*

Cea, J.C. de, Asanza, E. y Blanco, M. (2002). *Algunas ideas relativas a la protección e impermeabilización de paramentos de*

presas de hormigón in Llanos and col. (Eds.), Dam Maintenance & Rehabilitation, Editorial Balkema. 777-782 Rotterdam (Holanda)

Finn, N. y Barnes, S. (2002). *Evaporation Trials for Gale Pacific. CSIRO Textile and Fibre Technology: 26.*

Finn, N. y Barnes, S. (2007). *The benefits of shade-cloth covers for potable water storages. CSIRO Textile and Fibre Technology: 45.*

Gökbulak, F. y Özhan, S. (2006). *Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. E-Water. Official publication of the European Water Association (EWA). Hennef.*

International Commission on Large Dams. (1991). *Watertight Geomembranes for Dams. State of the Art. Bulletin ICOLD N° 78 Paris.*

Martínez, V. y Baille, A. (2009). *Evaporación en masas de agua: Propuestas metodológicas y aplicaciones en la Cuenca del Segura. Fundación Instituto Euromediterráneo del agua. Murcia.*

Martínez, V., Maestre, F. J. y Gallego, B. (2008). *Las pérdidas de agua por evaporación en balsas de regulación de riego y posibles soluciones. Revista Agrónomos 37, 37-46.*

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. (2010). *Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Madrid.

Noval, A. M. (2015). *Estudio del comportamiento de tres geomembranas de EPDM, PVC-P y PEAD a lo largo del tiempo. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Madrid.*

Pons, E. (2015). *Cubierta flotante fotovoltaica. Mejora del balance hídrico y energético. Jornada sobre impermeabilización de balsas para riego. San Fernando de Henares (Madrid), abril.*

Redón, M. (2011). *Diseño de un sistema de cubierta flotante fotovoltaica para balsas de riego Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.*

Renz, O. (2005). *Balsas cubiertas. I Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas. Sevilla.*

UN-104 317: (2011). *Materiales sintéticos. Determinación del recorrido del punzón antes de la perforación en geomembranas sintéticas impermeabilizantes instaladas en balsas.*

UNE-EN 13 361: (2013). *Barreras geosintéticas. Características para su utilización en la construcción de embalses y presas.*

Zanzinger, H. (2007). *The use of geosynthetics as barrier materials in civil engineering, in Sarsby, R. W. (ed.) Geosynthetics in civil engineering. Cambridge, England. Woodhead Publishing Limited.*

10. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POC-TEFEX, de la Comisión Europea (Fondos FEDER) la financiación del proyecto TTIGEM, en cuyos trabajos se enmarca este artículo. Igualmente agradece la colaboración de SECEGSA, entidad que junto al CEDEX ha desarrollado el proyecto TTIGEM.

MÁSTER EN MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA



La UNED y el CEDEX organizarán de forma conjunta en 2015 el Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, dentro de la convocatoria de Formación Permanente.

Desde 2009 es Máster Universitario de título propio (de la UPM hasta 2011 y de la UNED desde 2012). El Máster ha logrado ser una referencia absoluta en España y en Iberoamérica como excelente formación de profesionales de la geotecnia.

PROGRAMA

Consta de 14 módulos, de una semana de duración aproximadamente cada uno:

1. Mecánica del suelo básica (2,5 semanas)
2. Reconocimientos geotécnicos de campo
3. Mecánica de rocas
4. Cimentaciones superficiales
5. Cimentaciones profundas
6. Estabilidad de taludes
7. Estructuras de contención
8. Estructuras de tierra
9. Túneles
10. Mejora del terreno

11. Geotecnia de presas
12. Geotecnia medio ambiental y minera
13. Dinámica de suelos y de cimentaciones
14. Modelización numérica

El programa se completa con jornadas de Geotecnia Avanzada, distribuidas a lo largo del curso, que versan sobre:

- Geotecnia de estructuras costa afuera (off-shore)
- Geomecánica aplicada al del sector del gas y petróleo
- Fiabilidad geotécnica
- Modelos constitutivos
- Teoría del Estado Crítico
- Teoremas de estados límite
- Suelos no saturados
- Geotermia
- Licitación y evaluación técnico-económica de proyectos geotécnicos internacionales

El temario se refuerza con prácticas de laboratorio, de campo y de simulación en aula con códigos numéricos comerciales.

DESARROLLO DEL MÁSTER Y EVALUACIÓN

El Máster consta de un periodo lectivo, entre el 2 de febrero y el 8 de julio, de asistencia obligatoria, en cuyas clases se imparte el programa; y un periodo no lectivo, desde julio a octubre, durante el cual el alumno ha de desarrollar, bajo la tutela de un profesional del sector, una tesina que ha de defender ante un tribunal a finales de octubre. Las clases se imparten de lunes a viernes de 9:00 a 13:30 y, de 2 a 3 veces por semana, de 15:00 a 18:00 h. Se realiza una evaluación continua con ejercicios semanales y tres exámenes parciales.

LUGAR, COSTE Y CONDICIONES DE PREINSCRIPCIÓN

Las clases del Máster se impartirán en el aula del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, situado en la c/ Alfonso XII, nº3, de Madrid (CP 28014), contándose también con otras instalaciones docentes del Gabinete de Formación del CEDEX (salón de actos, aula de informática y biblioteca).

El importe de la matrícula, incluyendo material didáctico, jornadas y las visitas técnicas, es de 6.000 €.

BECAS

Existe la posibilidad de acceder a becas y medias becas de matriculación, sufragadas por empresas del sector y otorgadas por la Fundación Agustín de Betancourt.

En noviembre de 2014 se publicará la oferta de becas disponibles. La concesión se regirá por criterios académicos (establecidos por el CEDEX en coordinación con la UNED) y profesionales (pautados por las empresas colaboradoras).

El CEDEX y la UNED podrán otorgar ayudas al estudio.