

COMPORTAMENTO DA GEOMEMBRANA DE PEAD APÓS 20 ANOS EM SERVIÇO NO RESERVATÓRIO DE AREIAS DE VILAR

HDPE GEOMEMBRANE'S BEHAVIOUR AFTER 20 YEARS OF ITS INSTALLATION AT AREIAS DE VILAR WATER RESERVOIR

Barroso, Madalena, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*

Machado do Vale, José Luís, *Águas do Norte, Vila Real, Portugal, jose.vale@adp.pt*

RESUMO

A geomembrana de polietileno de alta densidade instalada nos taludes do Reservatório de Água Bruta da Estação de Tratamento de Areias de Vilar há mais de 20 anos, apresenta indícios de degradação e vários danos, tais como vincos, rasgos, punçoamentos e fissuras devido a stress cracking. Para estudar o comportamento da geomembrana, foram realizados ensaios laboratoriais, sobre amostras recolhidas da célula poente, em diferentes taludes, acima e abaixo do nível da água (geomembrana emersa e submersa). Foram realizados ensaios de resistência à tração/extensão, de resistência ao punçoamento estático e o tempo de indução à oxidação (OIT). Verificou-se que a resistência à tração na cedência, a extensão na rotura e a resistência ao punçoamento da geomembrana permanecem próximas dos valores iniciais, enquanto a resistência à tração na rotura e a extensão na cedência apresentaram uma diminuição. Verificou-se, igualmente, que o OIT diminuiu para um valor residual.

ABSTRACT

A high-density polyethylene geomembrane installed 20 years ago at Areias de Vilar Water Reservoir has experienced degradation and damages, such as tears, punctures and stress cracking. In order to study its behaviour, samples were taken from the west cell, from the four slopes, in two locations (above and below the water level.) Tensile tests, static puncture tests and oxidative induction time tests (OIT) were carried out. The results show that the tensile strength at yield, the strain at break and the puncture resistance of the geomembrane remains close to the initial values, while the tensile strength at break and the strain at yield showed a decrease. Also OITs measured were low and approaching a residual value.

1. INTRODUÇÃO

A Estação de Tratamento de Areias de Vilar (ETA) inclui um Reservatório de Água Bruta (RAB), constituído por duas células. O sistema de impermeabilização do reservatório integra uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD).

A geomembrana, instalada no reservatório no final da década de 90 do séc. XX, apresenta indícios de degradação, bem como vários danos, incluindo vincos, rasgos, punçoamentos e fissuras devido a *stress cracking*. Os danos existentes localizam-se,

sobretudo, na célula nascente, afigurando necessária a substituição da geomembrana a curto prazo.

Com vista a estudar o estado de degradação da geomembrana instalada na célula poente e estimar a sua vida útil e/ou programar a sua substituição, em 2019, foram recolhidas sete amostras nesta célula, para realização de ensaios laboratoriais.

Os ensaios laboratoriais incluem a determinação de algumas das principais propriedades da geomembrana, nomeadamente, a resistência à tração/extensão, a resistência ao punçoamento estático e o tempo de indução à oxidação (OIT).

Nesta comunicação, apresentam-se os resultados obtidos, os quais são comparados com valores das propriedades iniciais da geomembrana, ou com os valores mínimos recomendados pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI)-GM13 (2019), no caso do OIT.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OBRA

A Estação de Tratamento (ETA) de Areias de Vilar localiza-se no concelho de Barcelos, junto ao rio Cávado, a jusante da barragem de Penide. É constituída por um Reservatório de Água Bruta (RAB), um Reservatório de Regularização Principal e uma Estação Elevatória.

O RAB inclui duas células, com capacidade total de 175 000 m³, correspondente a uma reserva de água bruta para cerca de 24 horas (Figura 1). As células são delimitadas por diques em aterro de terra homogéneo, de 6,5 m de altura, com taludes de 1:2,25 (V:H). O sistema de impermeabilização do reservatório é constituído, nos taludes, por uma geomembrana de PEAD, com 1,5 mm de espessura e, na base, um tapete em betão betuminoso. A área impermeabilizada ocupa, aproximadamente, 20 000 m². A geomembrana assenta sobre um geotêxtil, de polipropileno, não tecido, agulhado.



Figura 1 – Vista geral da ETA de Areias de Vilar

No Quadro 1, resumem-se as principais características da ETA de Areias de Vilar.

Quadro 1 – Características gerais da ETA de Areias de Vilar

Localização	Areias de Vilar, Barcelos
Capacidade	175 000 m ³
Superfície livre do reservatório	3,6 ha
Área impermeabilizada	20 000 m ²
Carga hidráulica máxima sobre o sistema de impermeabilização	6,5 m
Volume de escavação no interior do reservatório	93 640 m ³
Volume de aterro	91 540 m ³
Altura máxima e inclinação dos taludes de aterro	6,5 m; 1:2,25 (V:H)
Largura do coroamento	5,0 - 6,0 m
Ano de construção	1997-1999
Geomembrana (taludes)	PEAD, 1,5 mm

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1. Propriedades iniciais da geomembrana

No Quadro 2 apresentam-se os valores requeridos no caderno de encargos (C.E.) para a geomembrana de PEAD, com 1,5 mm de espessura. Não foi possível obter a Ficha Técnica da geomembrana instalada na ETA de Areias de Vilar, nem há registo de resultados de ensaios laboratoriais realizados aquando da instalação. Contudo, à data da construção da obra, era prática corrente transcrever para o caderno de encargos os valores declarados pelos fabricantes nas fichas técnicas, pelo que se infere que os valores requeridos para as diferentes propriedades são semelhantes às propriedades iniciais da geomembrana.

Quadro 2 – Propriedades iniciais da geomembrana (inferidas com base no C.E.)

Propriedade	Norma de ensaio	Propriedades iniciais/Valores requeridos no C.E
Massa volúmica	ASTM D792 ou DIN 53479	> 0,94 g/cm ³
Absorção de água	DIN 53524	< 0,1 %
Resistência à tração na rotura		> 30 N/mm ²
Resistência à tração na cedência	ASTM D638 ou DIN 53455	≥ 15 N/mm ²
Extensão na rotura		> 550 %
Extensão na cedência		≥ 15 %
Ponto de amolecimento	ASTM D238 ou DIN 53735	< 1,0 g/10 min
Resistência ao rasgamento	ASTM D1034 ou DIN 53515	> 125 N/mm
Resistência ao punçoamento estático	DIN 54307	> 3 kN
Envelhecimento	ASTM D1593	> 1200 h
Estabilidade dimensional	ASTM D1234 ou DIN 53377	± 2%

3.2. Amostragem

Foram recolhidas sete amostras nos quatro taludes da célula poente, que apresenta menores danos, comparativamente à célula nascente, que será substituída brevemente. Seis amostras foram retiradas nos taludes virados a norte, a nascente e a sul, a duas cotas diferentes, correspondentes às situações em que a geomembrana se

encontra permanentemente acima do nível de água (emersa) ou abaixo do nível de água (submersa). A amostra restante foi recolhida num local onde a geomembrana apresentava um vinco pronunciado, numa zona emersa do talude virado a poente. Na Figura 2 ilustram-se os locais de amostragem nos diferentes taludes.



Figura 2 – Vista dos locais de amostragem nos diferentes taludes

3.3. Ensaios realizados

3.3.1. Resistência à tração/extensão

Os ensaios para avaliação da resistência à tração/extensão foram realizados segundo a norma ASTM D6693 (5 provetes tipo IV, ensaiados na direção de fabrico), à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, em vez dos $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ preconizados na norma.

Os ensaios foram realizados a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ com vista à comparação com a resistência à tração/extensão iniciais da geomembrana, uma vez que estas propriedades parecem ter sido determinadas com base na norma ASTM D638, segundo a qual os ensaios devem ser realizados a essa temperatura. A norma ASTM D6693 é, presentemente, recomendada pelo Comité ASTM D35 – Geossintéticos. Salienta-se que, à exceção da temperatura, os procedimentos de ensaios são semelhantes nas duas normas.

Segundo Rowe *et al.* (2009), as propriedades mecânicas são úteis para avaliar a degradação das geomembranas em resultado da oxidação (raios UV e temperatura). Com a oxidação a cristalinidade das geomembranas aumenta, tornando-as mais frágeis. Inicialmente, a oxidação pode levar a um aumento da resistência à tração na cedência e a uma diminuição na extensão na cedência. Contudo, à medida que a oxidação prossegue, a degradação acentua-se e a geomembrana torna-se extremamente frágil. Em consequência, a resistência à tração na cedência diminui.

3.3.2. Resistência ao punçoamento estático

Os ensaios de determinação da resistência ao punçoamento estático foram realizados segundo a norma NP EN ISO 12236. Esta norma é semelhante à norma DIN 54307, usada para avaliar as propriedades iniciais da geomembrana, pelo que os resultados são comparáveis.

Para além da resistência ao punçoamento, foi também registado o deslocamento (alongamento) na rotura. Conforme referido por Blanco *et al.* (2015), a distância percorrida pelo êmbolo antes da perfuração permite estimar a resistência à perfuração em condições reais, na medida em que dá uma ideia da adaptabilidade da geomembrana às características granulares do substrato onde assenta.

3.3.3. Tempo de indução à oxidação

Os ensaios de determinação do tempo de indução à oxidação (OIT) foram realizados segundo a norma ASTM D 3895 e interessaram a face exposta das amostras.

O valor mínimo do OIT não foi especificado no caderno de encargos, contudo, à época da instalação da geomembrana, as fichas técnicas nem sempre incluíam esta propriedade. Saliente-se que, segundo o GRI-GM13 (2019), o valor mínimo requerido para esta propriedade é, presentemente, de 100 minutos.

O OIT indica a quantidade de antioxidante que ainda resta na geomembrana, sendo este conhecimento extremamente útil na medida em que são os antioxidantes que protegem a geomembrana da degradação. De uma forma geral, a durabilidade das geomembranas de PEAD diminui com a oxidação.

De acordo com Hsuan e Koerner (1998), a degradação das geomembranas de PEAD inclui três fases:

- Fase I - depleção dos antioxidantes: fase em que os antioxidantes existentes na geomembrana são consumidos;
- Fase II - tempo de indução: fase correspondente ao intervalo entre a delapidação dos antioxidantes e o início da degradação das propriedades da geomembrana;
- Fase III - degradação do polímero: fase correspondente à modificação da estrutura do polímero, acompanhada pela deterioração das propriedades mecânicas da geomembrana (geralmente é considerada uma redução correspondente a 50% do valor original da propriedade).

O tempo de vida útil de uma geomembrana é considerado como a soma das três fases e pode variar entre menos de um ano a mais do que um século, dependendo das características iniciais da geomembrana e das condições de exposição (Rowe e Ewais, 2015).

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No Quadro 3 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados, bem como as propriedades iniciais inferidas para a geomembrana (ver secção 3.1). Nos ensaios mecânicos os resultados incluem, entre parêntesis, os desvios padrão registados, com vista a ilustrar a dispersão dos mesmos. No caso do ensaio de OIT, em vez dos

valores médios, são indicados os valores obtidos nos dois provetes ensaiados, por amostra.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios realizados e propriedades iniciais inferidas

Propriedades	Propriedades iniciais inferidas	Amostra	Taludes virados			
			Norte	Sul	Nascente	Poente
Resistência à tração na rotura (N/mm ²)	> 30 N/mm ²	emersa	23,1 (4,4)	20,1 (7,8)	25,3 (2,8)	20,0 (7,1)
		submersa	19,0 (6,9)	23,2 (7,2)	21,6 (8,7)	-
Extensão na rotura (%)	> 550 %	emersa	526 (95)	371 (225)	543 (69)	425 (110)
		submersa	411 (205)	502 (152)	424 (206)	-
Resistência à tração na cedência (N/mm ²)	≥ 15 N/mm ²	emersa	17,4 (0,7)	16,8 (0,5)	16,5 (1,1)	15,8 (1,2)
		submersa	16,9 (0,3)	15,6 (0,9)	15,9 (1,0)	-
Extensão na cedência (%)	≥ 15 %	emersa	8 (0,3)	9 (0,2)	9 (0,3)	9 (0,2)
		submersa	8 (0,3)	9 (0,9)	9 (0,4)	-
Resistência ao punçãoamento (kN)	> 3 kN	emersa	3,8 (0,5)	4,1 (0,3)	4,4 (-)	4,6 (0,2)
		submersa	4,1 (0,6)	4,1 (0,5)	4,5 (0,2)	-
Alongamento na rotura (mm)	-	emersa	50 (23,5)	79 (15,8)	96 (-)	98 (7,8)
		submersa	70 (28)	82 (22,1)	100 (6)	-
OIT (min)	> 100 *	emersa	3,6 – 4,4	1,7 – 5,9	3,7 – 4,1	0,9 – 2,0
		submersa	6,6 – 7,0	11,1 – 12,2	3,9 – 4,5	-

* valor mínimo requerido presentemente pelo GRI – GM 13 (2019)

No que se refere à resistência à tração/extensão, verifica-se que os resultados obtidos para a resistência à tração na rotura e para as extensões na rotura e na cedência foram inferiores aos valores das propriedades iniciais. Em contraste, a resistência à tração na cedência foi superior ao valor inicial, em todas as amostras. Numa primeira apreciação, os resultados sugerem que estas propriedades foram afetadas pelo envelhecimento da geomembrana. No entanto, a grande dispersão dos resultados obtidos para a resistência à tração na rotura e para a correspondente extensão, expressa pelos elevados desvios padrão, e o facto dos valores iniciais considerados nesta comparação não terem sido obtidos a partir de ensaios laboratoriais realizados sobre os rolos instalados na obra, faz com que essa apreciação deva ser encarada com algumas reservas. Em termos gerais, pode assumir-se que, após mais de 20 anos em serviço, a resistência à tração da geomembrana, na rotura, diminuiu claramente, mas, na cedência, a variação não é muito evidente. O mesmo acontece com extensão na rotura, cuja variação não pode considerar-se expressiva, enquanto, na cedência, esta propriedade diminuiu claramente.

Se tivermos em consideração os desvios padrão registados, verifica-se, também, que as condições de exposição (geomembrana emersa *versus* submersa) não parecem afetar a resistência à tração e a extensão na rotura e na cedência. De igual modo, observa-se que a orientação dos taludes também não parece ter influência nos resultados da resistência à tração e da extensão na rotura e na cedência. Os resultados obtidos podem considerar-se semelhantes para as amostras emersas e submersas e nos diferentes taludes, contrariamente ao que seria expectável.

Efetivamente, era de esperar que estas propriedades apresentassem valores inferiores nos ensaios realizados sobre as amostras mais expostas, nomeadamente, nas retiradas a cota superior, na parte em que a geomembrana se encontra permanentemente emersa, e no talude virado a sul, já que, de entre os vários fatores

que contribuem para a degradação das geomembranas de PEAD, o efeito dos raios UV é mais danoso, tal como indicado por Koerner *et al.* (2017).

Os resultados obtidos no presente estudo são consistentes com os relatados por Tarnowski e Baldauf (2006), Baldauf *et al.* (2012) e Reis *et al.* (2017). Os primeiros autores realizaram ensaios de tração/extensão sobre quatro geomembranas de PEAD expostas, aproximadamente, durante 30 anos, verificando que as suas propriedades mecânicas não sofreram alterações significativas, à exceção de uma geomembrana, que registou uma diminuição considerável da resistência à tração na rotura.

Baldauf *et al.* (2012), num estudo sobre durabilidade, ensaiou amostras de uma geomembrana de PEAD, em serviço num reservatório de água em Espanha, durante 17 anos. As amostras foram retiradas em dois locais, um acima do nível da água (geomembrana emersa) e outra numa zona intermitente (geomembrana abaixo/acima do nível da água). Para ambas as amostras, os valores de resistência à tração/extensão foram semelhantes aos valores iniciais, indicando que as condições de exposição da geomembrana (emersa *versus* parcialmente submersa) não tiveram influência sobre as suas propriedades mecânicas.

Variações pouco significativas da resistência à tração na cedência foram também obtidas por Reis *et al.* (2017), num estudo realizado com geomembranas de PEAD expostas em diferentes locais de Portugal, durante cerca 12 anos.

Resultados diferentes foram obtidos por Rowe e Ewais (2015). Estes autores relatam uma diminuição das propriedades mecânicas numa geomembrana de PEAD exposta durante 16 anos, sobretudo, uma diminuição da resistência à tração e na extensão na rotura, em algumas amostras ensaiadas na direção de fabrico. De acordo com os autores a diminuição das propriedades mecânicas pode estar relacionada com vários fatores, incluindo alterações na estrutura, oxidação e danos infligidos durante a construção e/ou a operação.

No que se refere à resistência ao punçoamento estático, observa-se que os valores obtidos neste estudo foram superiores aos valores iniciais, independentemente das condições de exposição da orientação dos taludes. Contudo, tal como anteriormente mencionado, o valor inicial desta propriedade não foi determinado laboratorialmente (ver secção 3.1), pelo que é possível que o valor inicial fosse superior ao inferido. Assim, em termos gerais, considera-se que a resistência ao punçoamento da geomembrana de PEAD não sofreu alterações significativas ao longo do tempo.

Não se conhece o valor inicial do alongamento correspondente à resistência ao punçoamento. Todavia, os resultados obtidos indicam que as condições de exposição da geomembrana (acima e abaixo do nível de água) e a orientação dos taludes não têm impacto significativo nos valores desta propriedade, se tivermos presente a dispersão dos resultados.

No que diz respeito ao OIT, verifica-se que os valores obtidos para esta propriedade foram reduzidos (entre 0,9 e 12,2 minutos), comparativamente com o valor mínimo recomendado pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI)-GM13 (2019), que é, presentemente, de 100 minutos.

Observa-se, também, que as amostras submersas, apresentaram valores de OIT maiores do que as amostras emersas, variando entre 3,9 e 12,2 minutos, para as

primeiras, e entre 0,9 e 5,9 minutos, para as segundas. Tendo em conta a variação dos resultados por amostra, estas diferenças não são muito significativas.

A orientação dos taludes parece ter um impacto reduzido nos resultados do OIT. Não é claro o motivo pelo qual as amostras mais expostas aos efeitos dos raios UV (talude virado a sul e amostras emersas), para as quais seria de esperar maior consumo de antioxidantes e, conseqüentemente, menores valores de OIT, apresentam valores semelhantes às amostras com menor exposição aos raios UV, como é o caso das amostras retiradas no talude virado a norte, ou das amostras retiradas abaixo do nível da água.

Em termos gerais, os valores de OIT obtidos indicam que a quantidade de antioxidantes presentes na geomembrana é residual. Estes resultados são consistentes com os relatados por Rowe e Ewais (2015), por Tarnowski e Baldauf (2006) e por Baldauf *et al.* (2012), nos estudos anteriormente referidos. As geomembranas com um valor residual de OIT podem encontrar-se, segundo Rowe e Ewais (2015), na fase II ou na fase III de degradação, definidas na ver secção 3.3.3.

Relativamente aos valores de OIT obtidos é importante salientar que as medições foram realizadas na superfície exposta da geomembrana. Tarnowski e Baldauf (2006) verificaram que os valores desta propriedade dependem da localização dos provetes na amostra, obtendo valores superiores quando os provetes foram retirados na zona intermédia (secção perpendicular) da geomembrana, o que evidenciou a importância da espessura na durabilidade das geomembranas. Com base nesses resultados, estes autores recomendaram que, em termos de durabilidade, a espessura fosse incluída nas especificações de projeto.

5. GEOMEMBRANA NA CÉLULA NASCENTE

Conforme anteriormente referido, a geomembrana instalada na célula nascente apresenta maior número de danos (Figura 3), nomeadamente, punçoamentos em diversos locais, sobretudo, junto à crista do talude, e fissuras, principalmente, na zona adjacente às uniões entre rolos (soldaduras), razão pela qual será substituída a curto prazo.

Tendo a instalação da geomembrana ocorrido nas duas células no mesmo período, a questão que levanta é porque motivo os danos são mais severos na célula nascente. A resposta a esta questão parece estar relacionada com qualidade da instalação. Por um lado, na célula nascente a geomembrana encontra-se, claramente, em tração e, por outro, as características do material subjacente não são as apropriadas, sobretudo, no coroamento na proximidade da vala de ancoragem, onde a geomembrana está mais tensionada e sobre um substrato de brita.

Efetivamente, quando uma geomembrana de PEAD fica sujeita a uma força de tração inferior à correspondente tensão de cedência, durante longos períodos de tempo, ocorrem alterações ao nível da microestrutura do polímero, que conduzem ao desenvolvimento de fissuras de tração (*stress cracking*), em geral junto às uniões. Também em resultado de *stress cracking*, no presente caso podem observar-se punçoamentos causados pela ação dos fragmentos rochosos, visivelmente, existentes sob a geomembrana.

Para evitar o aparecimento deste tipo de danos, as especificações de projeto devem limitar a deformação da geomembrana (PEAD), em condições de serviço, a um valor máximo admissível. Destacam-se, nesta comunicação, os valores propostos no regulamento Alemão de instalação de geomembranas, os quais são de 3%, para a extensão global (correspondente à totalidade de um painel), e de 0,25%, para extensões localizadas, impostas por cargas pontuais (deformações provocadas por pequenas protuberâncias, como, por exemplo, fragmentos rochosos em contacto com a geomembrana).



Figura 3 – Exemplos de danos observados junto à crista do talude e às uniões

Para o efeito, os trabalhos de instalação da geomembrana devem ser ajustados à temperatura ambiente. Em termos práticos, deve proceder-se à união dos rolos apenas nas horas mais frias do dia e adotar-se folgas compatíveis com o coeficiente de dilatação da geomembrana, para evitar que esta fique em tração. Deve, igualmente, definir-se o critério de aceitação da camada subjacente. De um modo geral, a geomembrana deve assentar sobre uma superfície plana, isenta de fragmentos rochosos e outros materiais potencialmente contundentes, elevações ou depressões, vegetação, mudanças bruscas de inclinação, exsurgências de água e fissuras por secagem excessiva.

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, apresentou-se o trabalho experimental realizado com vista a estudar o comportamento da geomembrana de PEAD, 1,5 mm de espessura, em serviço nos taludes da ETA de Areias de Vilar desde o final da década de noventa do séc. XX.

Para estudar o comportamento da geomembrana, foram realizados ensaios laboratoriais, sobre sete amostras recolhidas da célula poente, em diferentes taludes, acima e abaixo do nível da água. As propriedades avaliadas foram a resistência à tração e a extensão, na cedência e na rotura, a resistência ao punçoamento estático e o tempo de indução à oxidação (OIT).

Os resultados obtidos foram comparados com as propriedades iniciais da geomembrana, inferidas com base no caderno de encargo, uma vez que não se disponha de resultados de ensaios realizados sobre os rolos aplicados na obra. Quando tal não foi possível, o caso do OIT, os resultados foram comparados com os valores mínimos presentemente recomendados pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI)-GM13 (2019).

Após mais de 20 anos em serviço na ETA de Areias de Vilar, a geomembrana de PEAD instalada na célula poente apresenta valores de resistência à tração na cedência e de extensão na rotura semelhantes aos valores iniciais, assim como de resistência ao punçoamento. Pelo contrário, a resistência à tração na rotura e a extensão na cedência registaram um decréscimo comparativamente aos valores iniciais. Os valores de OIT foram muito inferiores ao valor mínimo requerido segundo o GRI-GM13 (2019).

Os resultados obtidos sugerem que, apesar das propriedades mecânicas ainda não evidenciarem a deterioração da geomembrana, geralmente assumida como uma redução correspondente a 50% do valor original das propriedades, a quantidade de antioxidantes existentes na geomembrana é residual, a qual pode não ser suficiente para assegurar a proteção contra a degradação a curto prazo, especialmente na face superior, mais exposta aos raios UV.

REFERÊNCIAS

- ASTM D3895. *Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA
- ASTM D6693. *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA
- Blanco, M.; Castillo, F.; Touze-Foltz, N.; Amat, B. e Aguiar, E. (2015). Behaviour of an EPDM Geomembrane 18 Years After Its Installation in a Water Reservoir. *International Journal of GEOMATE*, Sept., 2015, Vol. 9, No. 1 (Sl. No. 17), pp. 1348-1352
- Geosynthetic Research Institute (GRI) - GM13 (2019). *Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*. www.geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf, acessado em 21/01/2020
- Hsuan, Y. G. e Koerner, R. M. (1998). Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(6), pp. 532–541
- Koerner, R. M.; Hsuan, Y. G. e Koerner, G. R (2017). Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*, 24, No.2, pp. 198-212, <http://dx.doi.org/10.1680/jgein.16.00026>
- NP EN ISO 12236. *Geossintéticos. Ensaio do punçoamento estático (ensaio CBR)*. Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- Reis, A.; Barroso, M. e Lopes, M.G.A.D. (2017). Evolução de cinco geomembranas expostas a condições climáticas em Portugal durante 12 anos. *Revista Geotecnia*, n.º 14, novembro 2017; pp. 41-58, <http://dx.doi.org/10.24849/j.geot.2017.141.03>
- Rowe, R. K. e Ewais, A. M. R. (2015). Ageing of Exposed Geomembranes at Locations with Different Climatological Conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(3), pp. 326-343, <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2014-0131>
- Tarnowski, C. e Baldauf, S. (2006). Ageing Resistance of HDPE geomembranes - Evaluation of Long-Term Behaviour under Consideration of Project Experiences. *Geosynthetics*, Edited by J. Kuwano and J. Kosaki. Millpress, Rotterdam, pp. 359-362