

EVOLUÇÃO DE CINCO GEOMEMBRANAS EXPOSTAS A CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL DURANTE 12 ANOS

Evolution of five exposed geomembranes to climate conditions in Portugal throughout 12 years

Amélia Reis *

Madalena Barroso **

Maria da Graça Lopes***

RESUMO – A evolução das propriedades das geomembranas foi estudada com base em ensaios realizados sobre amostras expostas às condições climáticas, com e sem geotêxtil de cobertura, durante aproximadamente 12 anos, em diferentes locais de Portugal. Neste artigo, analisam-se a influência da exposição sobre diferentes geomembranas de PEAD, a influência da radiação ultravioleta sobre geomembranas expostas em locais com distintos índices de UV e a influência do geotêxtil de proteção às geomembranas. As propriedades em análise foram a massa volúmica, o índice de fluidez, a resistência à tração e a extensão na cedência e na rotura, o teor em negro de carbono e o tempo de indução à oxidação. Verificou-se que a exposição às condições climáticas afetou a massa volúmica e o tempo de indução à oxidação. Verificou-se, também, que o aumento do índice ultravioleta influenciou os resultados da resistência à tração e extensão na cedência e do tempo de indução à oxidação. Por fim, constatou-se que os resultados foram semelhantes para as geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

SYNOPSIS – To study how the properties of high density polyethylene geomembranes, exposed to climatic conditions, evolve throughout 12 years, a parametric study was carried out. Parameters under study included: (i) different geomembranes exposed in several regions of Portugal, aiming to assess the influence of climatic conditions; (ii) geomembranes exposed in locations with different ultraviolet index, in order to verify the influence of that index; (iii) the exposed samples, covered with and without geotextile, to evaluate the influence of such as a protection for geomembranes. The properties studied were: density, melt flow index, tensile properties, carbon black content, and oxidative induction time. The results show that the properties of the geomembranes exposed to climatic conditions present some deterioration, especially regarding the oxidative induction time and density. As for the geomembrane exposed in locations with different UV index, it suggests that the increase of this index impacts the tensile properties and oxidative induction time. Finally, it has been found that covered and exposed geomembranes presented similar results.

Palavras Chave – Geossintéticos, geomembranas, exposição a condições climáticas.

Keywords – Geosynthetics, geomembranes, exposure to climatic conditions.

* Eng.^a Civil, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal. E-mail: acreis@lnec.pt

** Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal. E-mail: mbarroso@lnec.pt

*** Professora Coordenadora Principal, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.

E-mail: glopes@dec.isel.pt

1 – INTRODUÇÃO

As geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são utilizadas em várias aplicações em geotecnia, permanecendo, por vezes, expostas às condições climáticas por longos períodos, como é caso das lagoas ou dos aterros de resíduos, cujos sistemas de impermeabilização não incluem a colocação de geossintéticos (*e.g.*, um geotêxtil) para proteção da geomembrana nos taludes.

As geomembranas expostas ficam sujeitas a condições adversas, nomeadamente, aos efeitos dos raios ultravioleta (UV), do oxigénio e da temperatura, o que pode levar à degradação das suas propriedades e comprometer o seu desempenho a longo prazo.

A degradação das propriedades das geomembranas devido à exposição às condições climáticas tem sido amplamente estudada. Contudo, os estudos realizados ou usaram geomembranas envelhecidas artificialmente em laboratório (*e.g.* Koerner *et al.*, 2011, 2017), ou se restringiram locais com condições climáticas específicas, que não representam a totalidade das condições registadas em Portugal (*e.g.* Lopes e Monteiro, 1999; Tarnowski e Baldauf, 2006; Carneiro, 2009; Rowe *et al.*, 2009; Baleki *et al.*, 2010; Yako *et al.*, 2010; Rowe e Ewais, 2015).

Para avaliar a evolução das propriedades das geomembranas em PEAD expostas às condições climáticas em Portugal, está em curso, desde 1999, um estudo no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Numa primeira fase, analisou-se a influência das condições climáticas sobre a resistência mecânica das soldaduras entre painéis adjacentes de geomembrana. Os resultados deste estudo foram apresentados por Lopes e Barroso (2004), Barroso *et al.* (2004, 2012) e Barroso e Lopes (2010).

Para dar continuidade ao referido estudo e, simultaneamente, alargar o seu âmbito às geomembranas propriamente ditas, foram realizados ensaios laboratoriais sobre as amostras após 12 anos de exposição. Foram avaliadas as seguintes propriedades: massa volúmica, resistência à tração e extensão na cedência, índice de fluidez, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação.

No presente estudo, analisa-se a influência da exposição às condições climáticas sobre as diferentes propriedades de cinco geomembranas de PEAD expostas, com e sem cobertura de geotêxtil, em oito locais diferentes, durante 12 anos, discute-se a influência da radiação UV sobre as propriedades de duas geomembranas expostas em locais com diferentes índices de UV e avalia-se a influência do geotêxtil como material de proteção às geomembranas.

Neste estudo foram, também, comparados os valores das diferentes propriedades das geomembranas com os requisitos mínimos, atualmente, preconizados pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI) - GM13 (2016), com vista a verificar se, após 12 anos de exposição, estes materiais ainda cumprem os valores mínimos preconizados. Os resultados desta comparação foram já apresentados por Reis (2016) e Reis *et al.* (2016), pelo que não serão incluídos no presente artigo.

2 – TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 – Amostras e localização

As amostras foram expostas no final da década de noventa, durante a construção de vários aterros de resíduos sólidos em Portugal, a partir de painéis de geomembrana, cortados na direção de fabrico. Incluíam uma soldadura dupla, realizada por termofusão, a meio da amostra. Foram divididas em duas partes, uma das quais foi coberta com um geotêxtil de proteção, tal como se pode observar na Figura 1.

As condições de exposição foram semelhantes para as diferentes geomembranas. As amostras foram colocadas na horizontal, em banquetas de taludes, ou em coberturas de edifícios, sem ficarem sujeitas a tensões de tração ou zonas em sombra. A zona de soldadura foi alinhada com a direção norte/sul.

Foram utilizadas cinco geomembranas de PEAD, lisas, com espessura nominal de 2,0 mm, as quais são designadas por GM-A, GM-B, GM-C, GM-D e GM-E. Foram expostas em oito locais



Fig. 1 – Exemplos de amostras expostas.

diferentes de Portugal (Figura 2): Valença, Viana do Castelo, Boticas, Vila Nova de Gaia, Bigorne, Aveiro, Figueira da Foz e Loulé. A GM-A foi exposta em três locais e a GM-B em dois locais diferentes.

Foram utilizadas cinco geomembranas de PEAD, lisas, com espessura nominal de 2,0 mm, as quais são designadas por GM-A, GM-B, GM-C, GM-D e GM-E. Foram expostas em oito locais diferentes de Portugal (Figura 2): Valença, Viana do Castelo, Boticas, Vila Nova de Gaia, Bigorne, Aveiro, Figueira da Foz e Loulé. A GM-A foi exposta em três locais e a GM-B em dois locais diferentes.

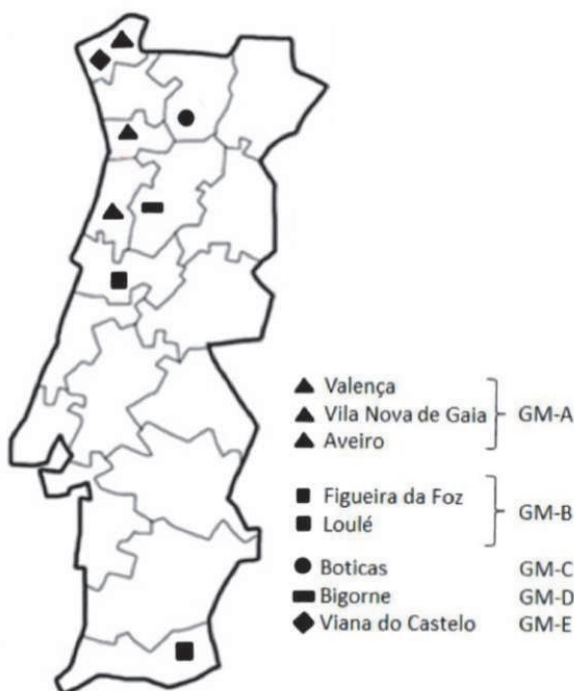


Fig. 2 – Locais de exposição das geomembranas no país.

O geotêxtil de proteção foi o mesmo em todos os locais: polietileno de alta densidade (cor preta), não tecido, agulhado, 3 mm de espessura e 300 g/m² de massa por unidade de área.

2.2 – Propriedades iniciais das geomembranas

No Quadro 1 apresentam-se as principais propriedades iniciais das geomembranas em estudo, de acordo com a sua localização. Os valores indicados foram determinados laboratorialmente, ou pelo LNEC durante o período de preparação das amostras, ou pelo fabricante no âmbito do seu controlo de fabrico e disponibilizados aquando da preparação das amostras. São, também, indicados os valores apresentados nas fichas técnicas das respetivas geomembranas.

Quadro 1 – Principais propriedades iniciais das geomembranas.

Propriedade	Norma de ensaio	Localização				
		GM-A (Valença, V.N. Gaia, Aveiro)	GM-B (Figueira da Foz, Loulé)	GM-C (Boticas)	GM-D (Bigorne)	GM-E (Viana do Castelo)
Massa volúmica (g/cm ³)	ASTM D1505	0,942*	0,940*	≥0,945*	0,940*	0,946* 0,945**
Resistência à tração na cedência (kN/m)	ASTM D6693	34* 31,9**	30* 40,5**	37*	34*	34* 36,5**
Extensão na cedência (%)		10* 13,2**	10* 10,4**	10*	11*	13* 14,7**
Resistência à tração na rotura (kN/m)		55* 68,1**	55* 58,9**	56*	70*	55* 44,7**
Extensão na rotura (%)		700* 578,2**	>700* 790,2**	>700*	≥750*	700* 830,2**
Teor em negro de carbono (%)	ASTM D1603	-	2,0*	2-3*	2-3*	2-3 2,1**
Tempo de indução à oxidação (OIT) (min)	ASTM D3895	-	-	-	100*	100* 82,2**
Índice de fluidez (190°C/5kg) (g/10 min)	ASTM D 1238	2,4* 0,96**	0,6-1,8* 0,8**	1,0*	1,0*	2,37**

Legenda: *Ficha Técnica | ** Determinado em laboratório | - = sem informação disponível

Conforme pode observar-se, existe uma diferença, por vezes significativa, entre os valores obtidos nos ensaios realizados sobre as amostras e os valores indicados nas fichas técnicas das geomembranas, o que se deve ao facto dos valores das fichas técnicas corresponderem a valores médios obtidos ao longo do tempo a partir de um número muito elevado de geomembranas ensaiadas.

2.3 – Métodos de ensaio

2.3.1 – Massa volúmica

Os ensaios de determinação da massa volúmica foram realizados segundo a norma ASTM D 1505. Este método é geralmente utilizado para materiais com massa volúmica inferior a 1g/cm³, que é normalmente o caso das geomembranas de PEAD. Estas, utilizando resinas com massas volúmicas na gama dos 0,934 a 0,938 g/cm³, só conseguem atingir valores da massa volúmica da ordem dos 0,941 a 0,950 g/cm³ (Rowe *et al.*, 2003), devido à adição de negro de carbono ou outros aditivos geralmente incorporados nas geomembranas.

A massa volúmica é importante no âmbito deste trabalho por estar diretamente relacionada com a cristalinidade dos polímeros (Halse *et al.*, 1991), a qual afeta as propriedades térmicas (ponto de endurecimento, viscosidade e temperatura de fusão), mecânicas (resistência à tração, torção, ao impacto e flexibilidade a baixa temperatura) e químicas (resistência química, resistência à fissuração - *stress cracking* na literatura anglo sónica) da geomembranas.

No Quadro 2 resume-se o modo como as propriedades das geomembranas variam de acordo com o aumento da massa volúmica do polietileno.

Quadro 2 – Variação das diferentes propriedades do polietileno com o aumento da massa volúmica (Lodi, 2003).

Propriedades	Tendência de variação
Térmicas:	
Ponto de endurecimento	Grande aumento
Viscosidade e termofusão	Aumento
Mecânicas:	
Espessura	Aumento
Resistência à tração	Aumento
Resistência à torção	Aumento
Resistência ao impacto	Diminuição
Flexibilidade a baixa temperatura	Diminuição
Químicas:	
Resistência à fissuração	Diminuição
Permeabilidade	Diminuição
Resistência química	Aumento

2.3.2 – Índice de fluidez (MFI)

Os ensaios de determinação do índice de fluidez foram realizados segundo a norma ASTM D1238. Foram realizados a 190°C e com uma carga nominal de 5,0 kg. Estes ensaios são usados para quantificar massa (em gramas) do polímero extrudido em 10 minutos, através de um orifício normalizado, sob determinadas condições de pressão e temperatura.

O valor do MFI permite avaliar indiretamente o peso molecular dos polímeros termoplásticos. Um valor alto deste índice indica que o polímero apresenta um peso molecular baixo, propriedade que condiciona diretamente as propriedades mecânicas da geomembrana. Salienta-se que a comparação de valores do índice de fluidez só tem significado se forem comparadas geomembranas de um mesmo polímero (Rowe e Ewais, 2015).

O MFI pode ser usado como indicador de oxidação. A degradação do polímero por oxidação pode induzir tanto a reações que originam ligações cruzadas (*crosslinking*) como a reações de cisão da cadeia polimérica (*chain reaction*), ambas produzindo alterações no peso molecular. Das primeiras resulta um aumento no peso molecular, enquanto as segundas conduzem a uma diminuição do peso molecular (Lodi, 2003; Rowe e Ewais, 2015).

2.3.3 – Resistência à tração/extensão

Os ensaios para avaliação da resistência à tração/extensão foram realizados segundo a norma ASTM D6693.

As geomembranas de PEAD apresentam um pico de tensão bem definido (ponto de cedência) para pequenas extensões (cerca de 15%). Com o aumento da solicitação à tração o polímero na sua parte central sofre um alongamento (com estreitamento lateral) fazendo com que os valores da resistência diminuam após o ponto de cedência, devido ao ensaio se realizar a uma velocidade de deformação constante. Com a continuação do aumento da solicitação, dá-se um aumento do valor da resistência, atribuído a um rearranjo molecular. A rotura atinge-se para valores da extensão muito elevados (da ordem dos 700 a 1200%), sendo os valores da resistência na rotura também muito superiores aos da cedência do material (Lodi, 2003) como ilustra a Figura 3.

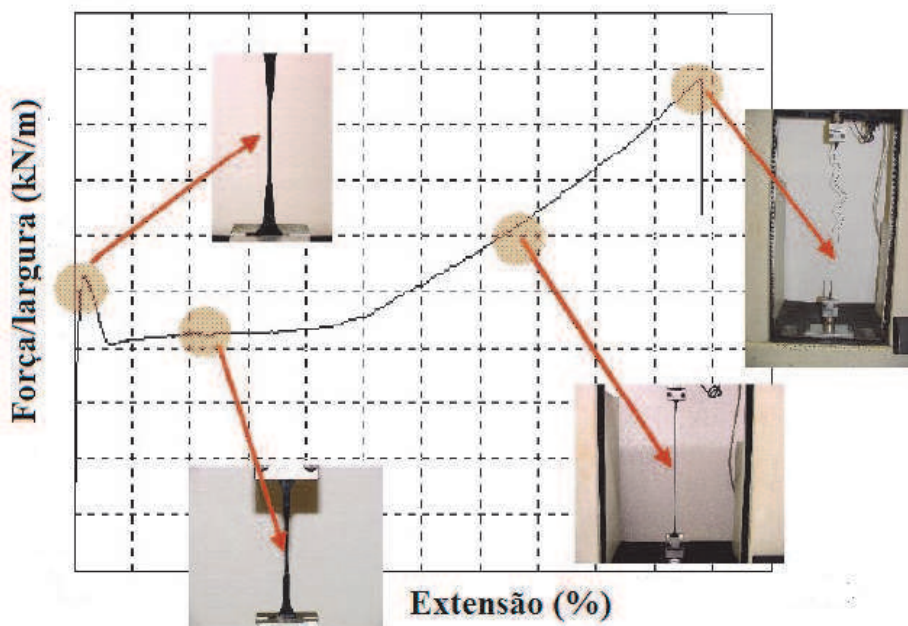


Fig. 3 – Comportamento Força/Extensão de Geomembranas de PEAD (Lodi, 2003).

As propriedades mecânicas das geomembranas são úteis para avaliar a degradação das geomembranas em resultado da oxidação. 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 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 diminui (Rowe *et al.*, 2009).

2.3.4 – Teor em negro de carbono

Os ensaios de determinação do teor em negro de carbono foram realizados segundo a norma ASTM D 1603.

O negro de carbono é um aditivo que se junta à formulação da geomembrana para minimizar os efeitos negativos dos raios UV sobre os polímeros, os quais conduzem à degradação das propriedades mecânicas das geomembranas, nomeadamente ao surgimento de comportamento frágil e de fissuras. A percentagem de negro de carbono tipicamente adicionada às geomembranas de PEAD é da ordem dos 2 a 3 %.

A degradação dos materiais poliméricos conduz tipicamente a uma diminuição do teor de negro de carbono.

2.3.5 – Tempo de indução à oxidação

A avaliação da estabilidade de oxidação do polietileno pode ser obtida pela medida do tempo de indução à oxidação (OIT) segundo a norma ASTM D 3895. Este tempo é o necessário para que uma amostra de geomembrana seja oxidada, sob determinadas condições de pressão e temperatura. Os valores de OIT indicam a quantidade (não o tipo) de antioxidante que ainda resta na geomembrana. Este conhecimento é extremamente útil uma vez que são os antioxidantes que protegem a geomembrana da degradação.

De uma forma geral, a durabilidade das geomembranas de PEAD diminui com a oxidação, em resultado da reação entre o oxigénio e o polímero.

Segundo Hsuan e Koerner (1998), a degradação química das geomembranas de PEAD inclui três fases:

- depleção dos antioxidantes: fase em que os antioxidantes existentes na geomembrana são consumidos;
- tempo de indução: fase correspondente ao intervalo entre a delapidação dos antioxidantes e o início da degradação das propriedades da geomembrana;
- 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).

A resistência à oxidação depende das características e da quantidade de antioxidantes adicionados ao polímero para evitar a degradação da geomembrana.

3 – RESULTADOS

3.1 – Influência da exposição às condições climáticas sobre as diferentes geomembranas

Para estudar a influência da exposição às condições climáticas sobre diferentes geomembranas compararam-se os resultados obtidos para cinco geomembranas expostas (GM-exp) com os valores de referência.

Foram adotados como valores de referência os obtidos a partir dos ensaios laboratoriais iniciais, realizados pelo LNEC ou pelo fabricante no âmbito do seu controlo de fabrico (GM-ensaios iniciais). Na ausência de resultados laboratoriais, foram usados os valores indicados nas fichas técnicas (GM-ficha técnica). Recordar-se que os valores indicados nas fichas técnicas correspondem a valores médios dos ensaios realizados pelo fabricante ao longo do tempo, pelo que as comparações são encaradas numa perspetiva de tendência geral.

Nas Figuras 4 a 9 apresentam-se os resultados obtidos, respetivamente, para a massa volúmica, o índice de fluidez (MFR), a resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, o teor em negro de carbono e o tempo de indução à oxidação, para as geomembranas expostas, bem como os valores de referência. Os resultados obtidos são representados sob a forma de gráfico de barras e incluem as barras de erro correspondentes ao desvio padrão.

No que se refere à massa volúmica (Figura 4), verifica-se que todas as geomembranas expostas às condições climáticas apresentam valores superiores aos valores de referência, à exceção da GM-E, cujos valores foram idênticos. De referir que, para a GM-E, os valores usados como referência provieram de ensaios laboratoriais iniciais, enquanto para as restantes geomembranas foram obtidos a partir das fichas técnicas.

A tendência de aumento da massa volúmica pode estar relacionada com alterações na estrutura do polímero, em consequência da ação dos raios UV, da oxidação e da temperatura, cujo efeito combinado pode levar ao aumento das zonas amorfas no polímero e consequente diminuição da cristalinidade. Os valores obtidos para o tempo de indução à oxidação, que se apresentam na Figura 9, tendem a confirmar a ocorrência de oxidação dos polímeros.

Para o índice de fluidez (Figura 5), verifica-se que os valores obtidos para as GM-A e GM-B expostas são superiores aos valores de referência, enquanto para as GM-C, GM-D se observa a tendência contrária. Para GM-E obtiveram-se valores idênticos. De referir que, para as GM-C e GM-D, os valores de referências são os indicados nas fichas técnicas, pelo que, correspondendo a valores médios, podem ter sido adotados como referência valores superiores aos valores iniciais daquelas geomembranas. Lodi *et al.* (2007) e Rowe *et al.* (2003) relatam aumentos nesta propriedade em resultado da exposição às condições climáticas, tendo atribuído esse aumento à degradação das geomembranas devido ao efeito dos raios UV.

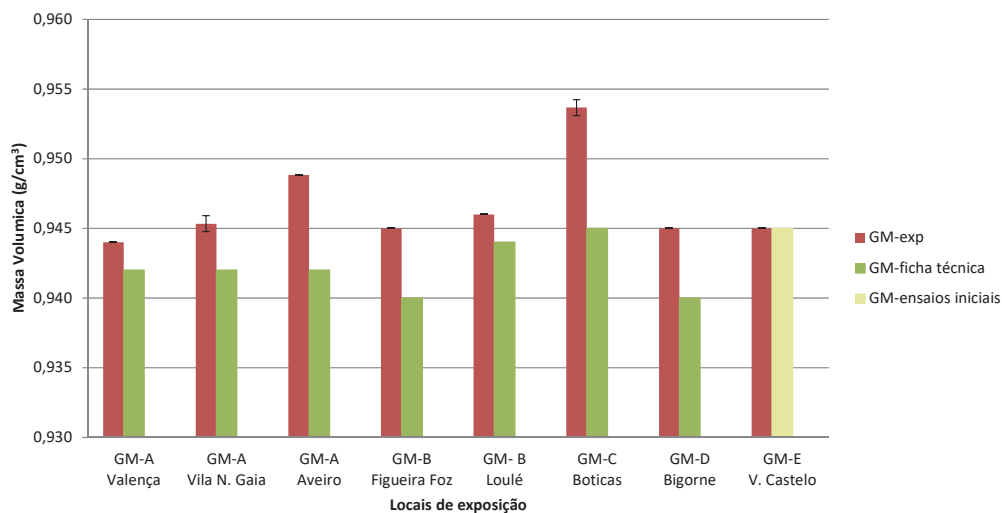


Fig. 4 – Comparação entre os valores de massa volúmica das geomembranas expostas e de referência.

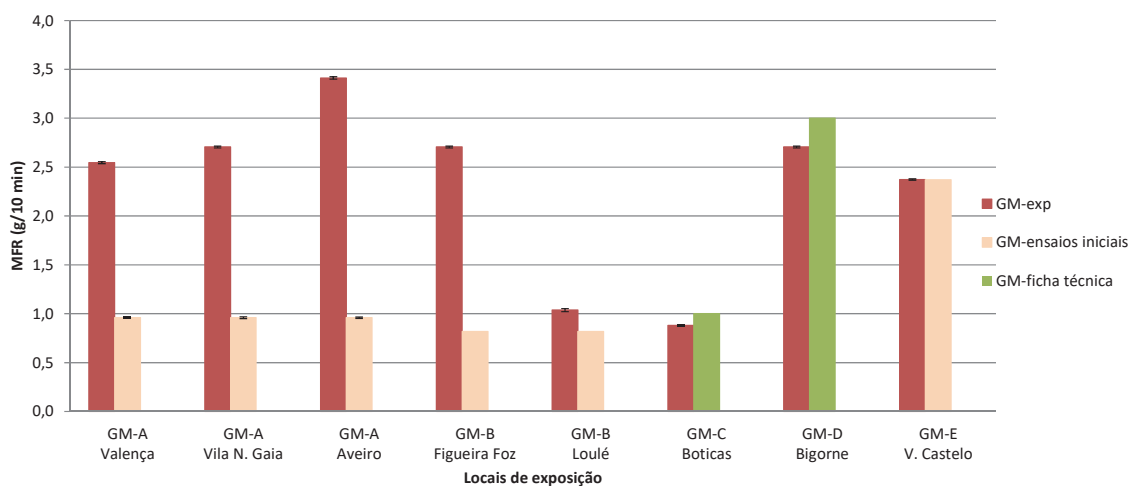


Fig. 5 – Comparação entre os valores de índice de fluidez (MFR) das geomembranas expostas e de referência.

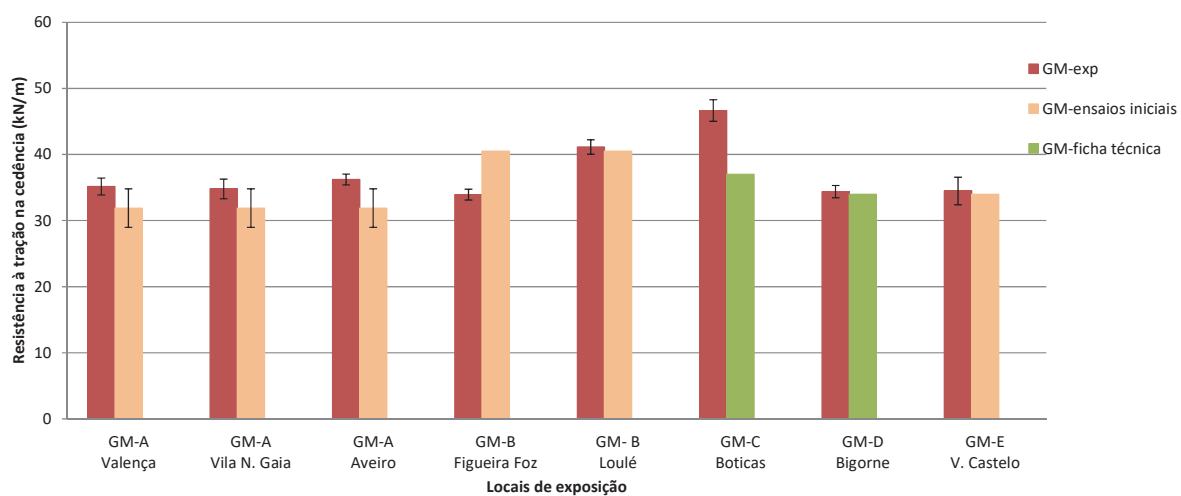


Fig. 6 – Comparação entre os valores de resistência à tração na cedência das geomembranas expostas e de referência.

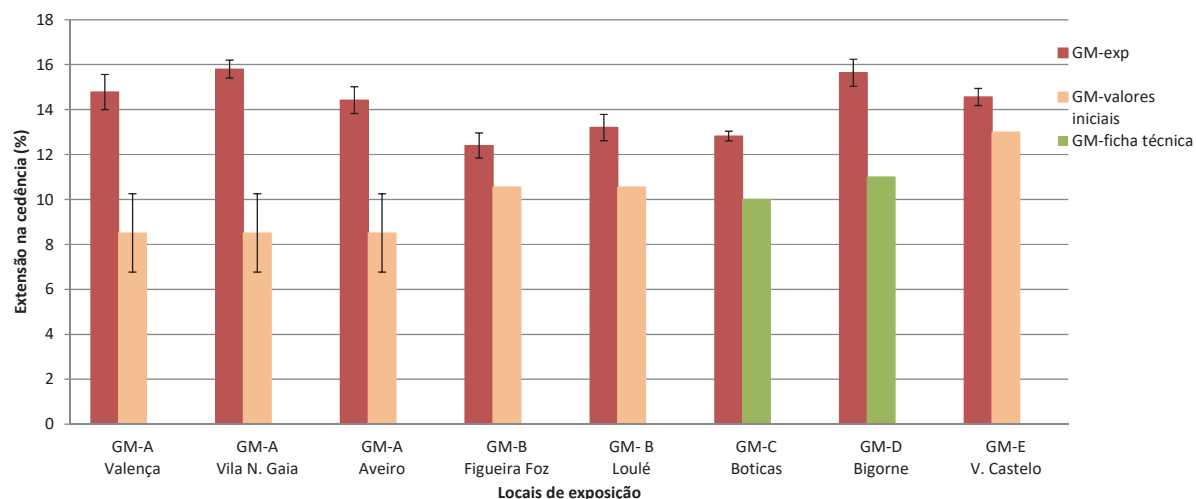


Fig. 7 – Comparação entre os valores de extensão na cedência das geomembranas expostas e de referência.

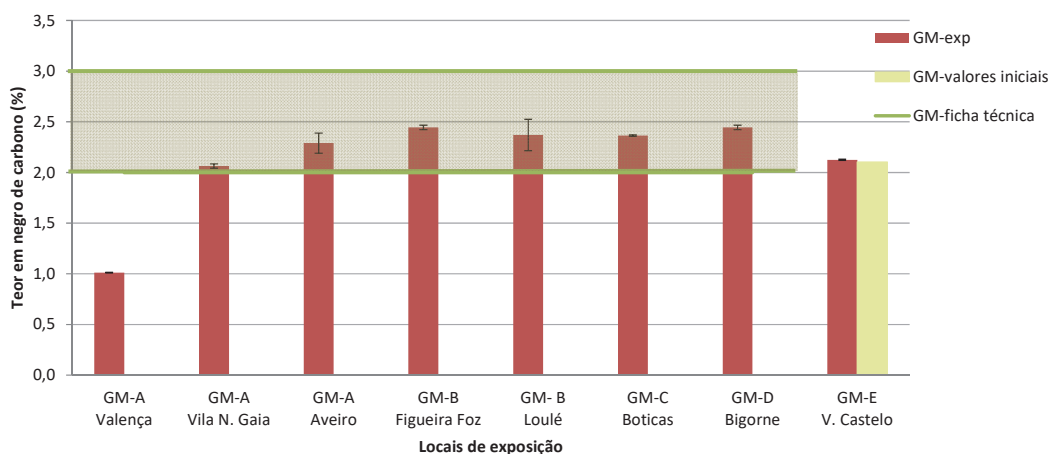


Fig. 8 – Comparação entre os valores de teor em negro de carbono das geomembranas expostas e de referência.

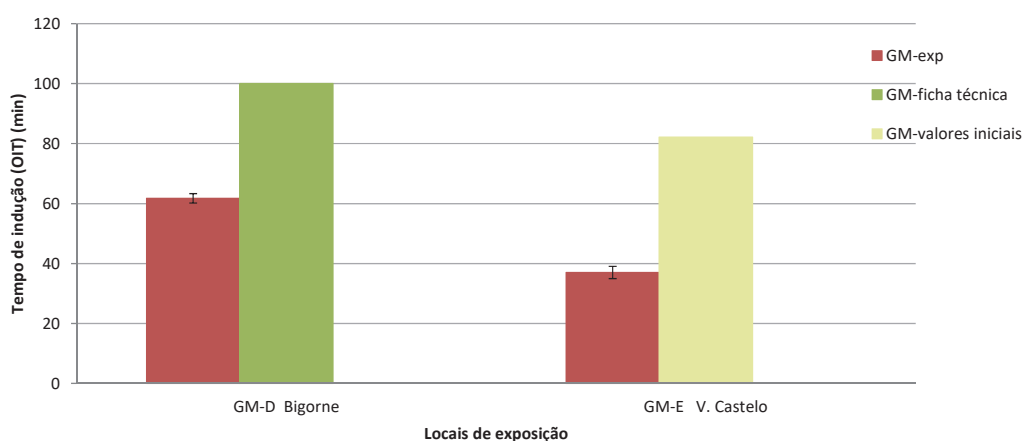


Fig. 9 – Comparação entre os valores do tempo de indução à oxidação das geomembranas expostas e de referência.

Conforme se pode ver na Figura 6, a resistência à tração na cedência apresenta variações pouco significativas, se se tiver em consideração a dispersão dos resultados expressa pelas barras de erro. É, no entanto de salientar que, à exceção da amostra exposta na Figueira da Foz, a resistência à tração na cedência aumentou. Este aumento é consistente com o aumento da massa volúmica, tal como pode observar-se no Quadro 2. O aumento da resistência à tração pode estar relacionado com a oxidação do polímero. De acordo com Rowe *et al.* (2009), inicialmente a oxidação pode levar a um aumento da resistência à tração na cedência e uma diminuição na extensão na cedência, na medida em que a geomembrana se torna frágil. Com a progressão da degradação, as propriedades a resistência à tração vai diminuindo, conforme comprovam os estudos realizados por Tarnowski e Baldauf (2006) e por Rowe e Ewais (2015).

No que refere à extensão na cedência, os valores obtidos para as geomembranas expostas, de um modo geral, são superiores aos valores de referência. Não é clara a razão deste comportamento. Estes resultados diferem dos resultados obtidos por Rowe e Ewais (2015), que relatam uma diminuição das propriedades mecânicas numa geomembrana exposta durante 16 anos. De acordo com os autores a diminuição das propriedades mecânicas pode estar relacionada com vários fatores, incluído alterações na estrutura, foto-oxidação e termo-oxidação. A diferença entre os resultados apresentados no presente trabalho e os resultados relatados por aqueles autores pode estar relacionada com as diferenças entre as condições climáticas prevalecentes durante os períodos de exposição.

Para o teor em negro de carbono (Figura 8), à exceção da GM-E exposta em Viana do Castelo, verifica-se que os valores de referência correspondem a um intervalo compreendido entre 2 e 3%, o que inviabiliza a comparação, pois não se dispõe apenas de um valor. No que se refere à GM-E, observa-se que os valores são semelhantes, sugerindo que a exposição não afetou esta propriedade da GM-E.

Para o tempo de indução à oxidação (Figura 9), não foram realizados ensaios laboratoriais iniciais e apenas as GM-D e GM-E incluem nas fichas técnicas valores para esta propriedade, pelo que só se dispõe de valores de referência para duas amostras. Os resultados obtidos para as geomembranas expostas foram bastante inferiores aos valores de referência, sugerindo que ocorreu consumo de antioxidantes devido à exposição das amostras às condições climáticas. No entanto, é de salientar que apesar do consumo ainda restam antioxidantes nas geomembranas. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Rowe *et al.* (2003), Lodi *et al.* (2007), Tarnowski e Baldauf (2012) e por Rowe e Ewais (2015), que relataram grandes decréscimos nos valores desta propriedade em consequência da exposição às condições climáticas.

Em suma, verificou-se que a massa volúmica e a extensão aumentaram com a exposição às condições climáticas. Para o índice de fluidez e para o teor em negro de carbono não foi possível estabelecer nenhuma tendência. Para a resistência à tração na cedência os resultados das geomembranas expostas foram semelhantes às propriedades iniciais. O tempo de indução diminuiu significativamente com a exposição às condições climáticas. Assim, a exposição às condições climáticas parece afetar apenas a massa volúmica e o tempo de indução à oxidação.

3.2 – Influência do índice UV

O conceito de índice UV foi desenvolvido num contexto de saúde pública, para fornecer informação às populações sobre a intensidade máxima diária da radiação ultravioleta num dado local, assim como a sua evolução, tendo em conta a diminuição observada e prevista da espessura da camada de ozono à escala global.

O índice UV exprime-se como o resultado da multiplicação do valor médio no tempo da irradiância efetiva (W/m^2) por 40. Por exemplo, a uma irradiância efetiva de $0,2 W/m^2$ corresponde um valor do índice UV de 8,0. É um número inteiro diretamente proporcional à intensidade de radiação ultravioleta à superfície que pode produzir uma queimadura solar na pele humana. De acordo com as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e da Organização

Mundial de Saúde (OMS) foi convencionada a seguinte classificação qualitativa para os vários níveis de índice UV (Quadro 3).

Quadro 3 – Classificação qualitativa para os vários níveis do índice UV (Nunes *et al.*, 2013).

Índice UV	Classificação OMS	
1 a 2	Baixo	[0; 2,5[
3 a 5	Moderado	[2,5; 5,5[
6 a 7	Alto	[5,5; 7,5[
8 a 10	Muito Alto	[7,5; 10,5[
Maior que 11	Extremo	[10,5; ...[

Rowe e Ewais (2015) propuseram uma relação entre o índice UV e a temperatura da geomembrana, sendo que a última tinha previamente sido relacionada com a taxa de degradação a partir dos resultados relatados por Rowe *et al.* (2012) e por Peggs (2008), para geomembranas expostas em locais com diferentes índices de UV (Quadro 4).

Adotando a metodologia descrita por Rowe e Ewais (2015), no presente trabalho compararam-se os resultados obtidos para as geomembranas GM-A e GM-B expostas em locais com diferentes índices UV, com vista a estudar a influência deste índice sobre as propriedades das geomembranas expostas durante 12 anos.

Observando a distribuição média do índice UV para céu limpo (IUV_{CL}) na Península Ibérica no período compreendido entre 2003 e 2012 (Figura 10), obtida com base nos dados recolhidos por satélite e extraídos do *website* <http://temis.nl/>, convertidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera e apresentados por Nunes *et al.* (2013), verifica-se que este índice aumenta com diminuição da latitude (de norte para sul). De referir que, segundo os mesmos autores, os valores médios do índice UV em Portugal apresentam uma variação sazonal, variando de 3 a 6, entre outubro e abril, e de 9 a 10, entre maio e setembro.

Quadro 4 – Relação entre o índice UV e a temperatura da geomembrana de cor preta exposta (Rowe e Ewais, 2015).

Índice UV	Taxa de degradação	Temperatura da geomembrana (°)
0 – 2	Baixa	20
		25
3 – 5	Moderada	30
		35
6 – 7	Alta	40
		45
		50
8 – 10	Muito Alta	55
		60
		65
	--	70
>11	Extrema	75
		80
		85

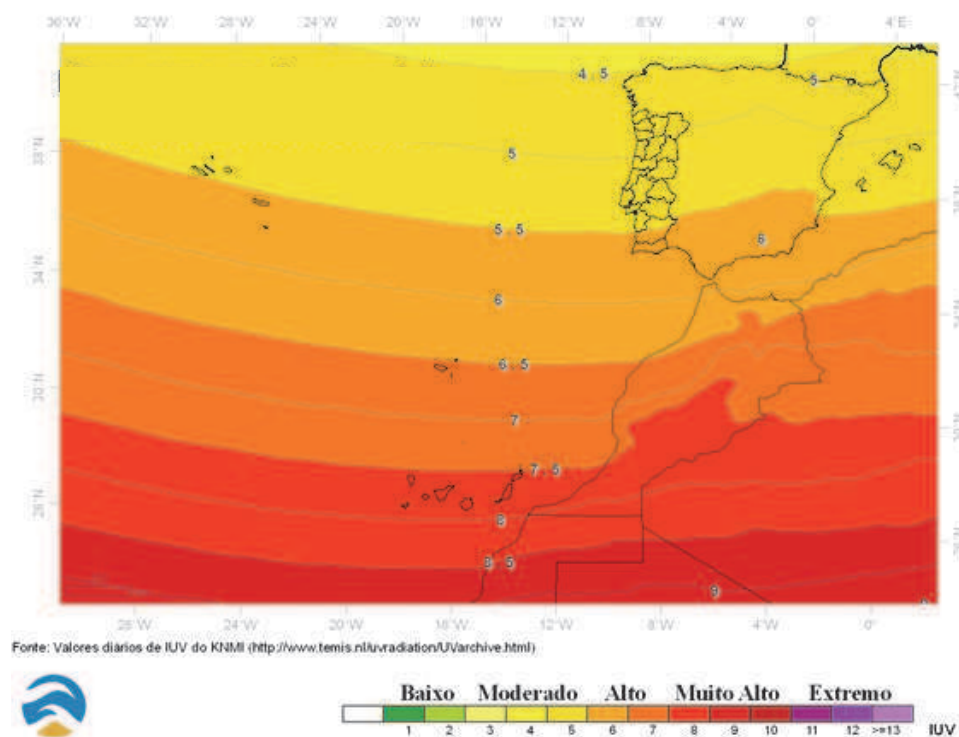


Fig. 10 – Distribuição do valor médio do índice UV_{CL} para o período de 2003-2012 (Nunes *et al.*, 2013).

Conforme pode constatar-se na Figura 10, em grande parte do território nacional o índice UV médio varia entre 4,5 e 5,5, com valor médio de 5. Nestas circunstâncias, os locais de exposição da GM-A apresentam todos o mesmo valor de índice UV, pelo que não é possível estudar o impacto deste índice sobre as geomembranas expostas. No Quadro 5, apresenta-se a variação das propriedades da GM-B exposta 12 anos em dois locais com diferente índice UV.

Quadro 5 – Propriedades da GM-B exposta 12 anos em locais com diferente índice UV.

Propriedade	Figueira da Foz Índice UV médio = 5	Loulé Índice UV médio = 6
Massa volúmica (g/cm^3)	0,945	0,946
Índice de fluidez ($190^\circ C/5kg$) ($g/10\ min$)	2,706	1,038
Resistência à tração na cedência (kN/m)	33,920	41,120
Extensão na cedência (%)	12,400	13,200
Teor em negro de carbono (%)	2,40	2,37
Tempo de indução à oxidação (OIT) (min)	61,75	55,50

Verifica-se que a massa volúmica não sofreu alterações significativas com o aumento do índice UV, tendo em conta o desvio padrão associado a estes resultados, sugerindo que o aumento deste índice não influencia a massa volúmica.

No caso do índice de fluidez, verifica-se uma diminuição desta propriedade com o aumento do índice UV, sugerindo que o mesmo influenciou esta propriedade.

Para a resistência à tração e extensão na cedência, observou-se um aumento destas propriedades com o aumento do índice UV, especialmente a resistência à tração, indicando que este índice UV teve influência na resistência. Tal como anteriormente mencionado, o aumento destas propriedades

pode estar relacionado com a oxidação do polímero, que numa fase inicial da degradação torna a geomembrana mais frágil, bem como com o aumento cristalinidade do polímero numa fase inicial de degradação, conforme indicado por Rowe *et al.* (2003).

No que se refere ao teor em negro de carbono, verifica-se que os valores na Figueira da Foz e em Loulé são semelhantes tendo em conta o desvio padrão associado a estes resultados, sugerindo o índice UV não influencia o teor em negro de carbono.

Para o tempo de indução à oxidação, verifica-se que o índice UV foi inferior para a amostra exposta em Loulé, o que pode estar relacionado com um maior consumo de antioxidantes, em consequência de a amostra estar exposta numa zona caracterizada por maior índice UV.

Em suma, o aumento do índice UV registado entre Figueira da Foz e Loulé poderá ter influenciado os resultados da resistência à tração e extensão na cedência e do tempo de indução à oxidação. Relativamente a esta última, os resultados sugerem que ocorreu maior consumo de antioxidantes na amostra exposta no local caracterizado por um maior índice UV.

3.3 – Influência do geotêxtil de proteção

Para estudar a influência do geotêxtil na proteção às geomembranas compararam-se os resultados obtidos para as amostras expostas com e sem geotêxtil de cobertura. Estavam nestas condições as geomembranas GM-A, GM-B, e GM-C expostas, respetivamente, em Aveiro, Loulé e Boticas.

Nas Figuras 11 a 16 apresentam-se os resultados obtidos, respetivamente, para a massa volúmica, o índice de fluidez, a resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, o teor em negro de carbono e o tempo de indução à oxidação, para as geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura (GM-cob e GM-exp).

Para a massa volúmica (Figura 11), verificou-se que os valores obtidos foram menores para a GM-cob do que para a GM-exp, para as amostras expostas em Aveiro (GM-A) e Boticas (GM-C). Salienta-se que as geomembranas cobertas com geotêxtil ficam em condições semelhantes às geomembranas não expostas, pelo que estes resultados são consistentes com os apresentados na seção 3.1. Em Loulé (GM-B), a geomembrana coberta apresentou uma massa volúmica superior à geomembrana exposta sem geotêxtil, contrariamente ao esperado, não sendo clara a razão deste comportamento. Assim, não é possível estabelecer uma tendência geral para esta propriedade.

Para o índice de fluidez (Figura 12), resistência à tração e extensão na cedência (Figuras 13 e 14) e teor em negro de carbono (Figura 15), verifica-se que os resultados para as GM-cob e GM-exp são muito semelhantes em todos os locais de exposição, tendo em consideração a dispersão dos resultados expressa pelas barras de erro. Estes resultados são coerentes com os obtidos na comparação entre os resultados apresentados na seção 3.1, os quais indicam que estas propriedades não foram substancialmente afetadas pela exposição das geomembranas durante 12 anos, pelo que ainda não é possível verificar se o geotêxtil proporciona uma proteção adicional à geomembrana. Salienta-se que os geotêxteis apresentavam visualmente sinais de degradação, nomeadamente pulveriza-se quando solicitado com a mão. A degradação do geotêxtil inviabilizará a continuação deste estudo no futuro.

Para o tempo de indução à oxidação (Figura 16), verificou-se, em Aveiro (GM-A), os resultados obtidos para a GM-exp foram superiores aos obtidos para GM-cob, contrariamente ao esperado. Não é claro o motivo desta ocorrência. Para as amostras expostas em Loulé e Boticas (GM-B e GM-C), os resultados foram semelhantes, tendo em consideração a dispersão dos resultados expressa pelas barras de erro associadas aos resultados. Estes resultados sugerem que o geotêxtil não proporcionou proteção adicional às geomembranas. Sugerem igualmente que a oxidação das geomembranas tem lugar mesmo quando estão cobertas, já que os obtidos são substancialmente inferiores aos valores de referência.

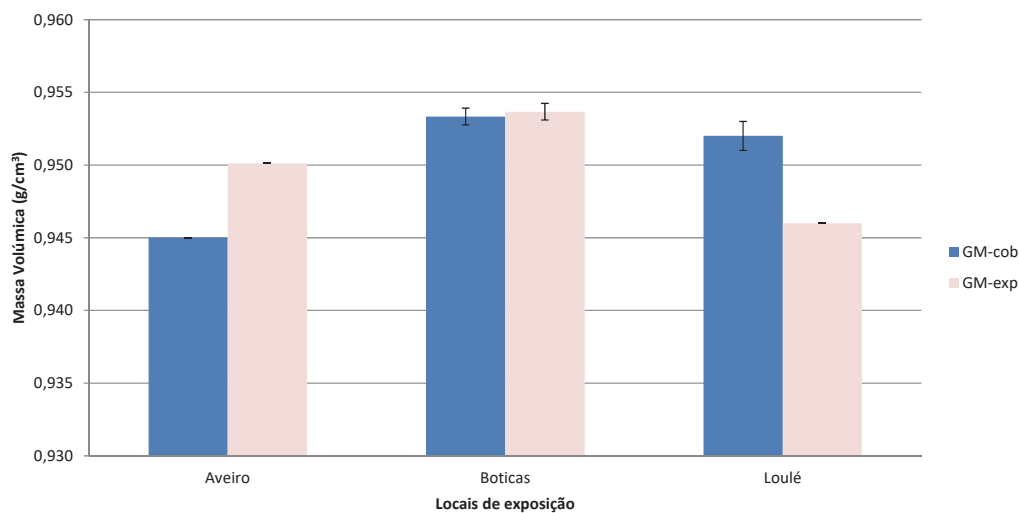


Fig. 11 – Comparação da massa volúmica entre geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

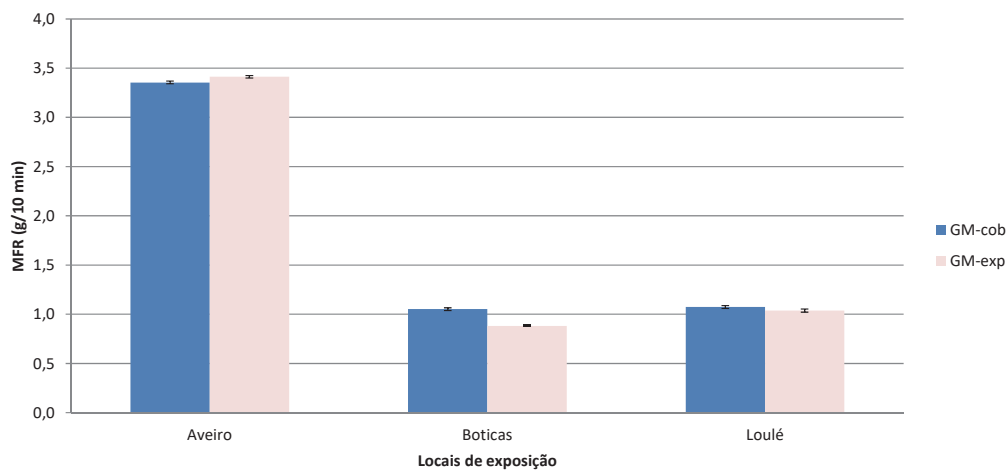


Fig. 12 – Comparação do índice de fluidez (MFR) entre geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

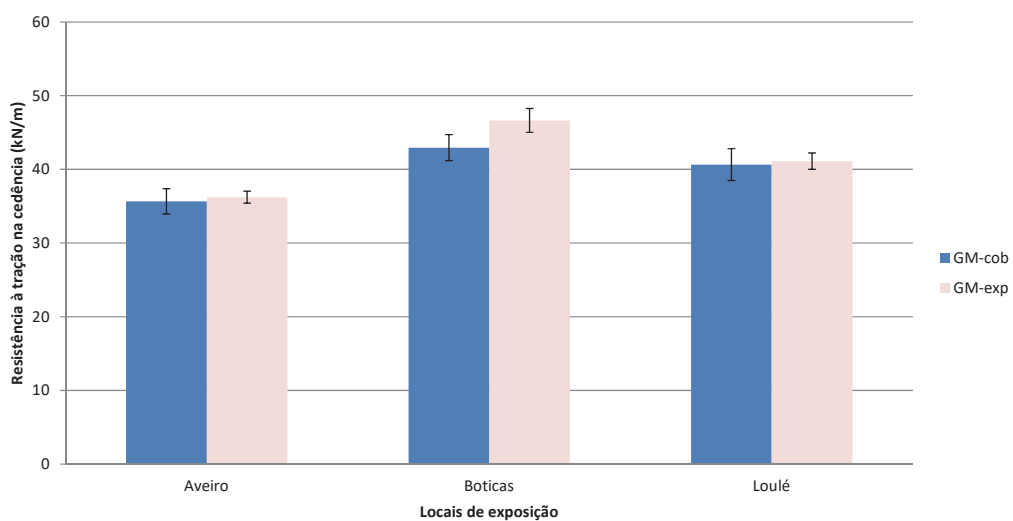


Fig. 13 – Comparação da resistência à tração na cedência entre geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

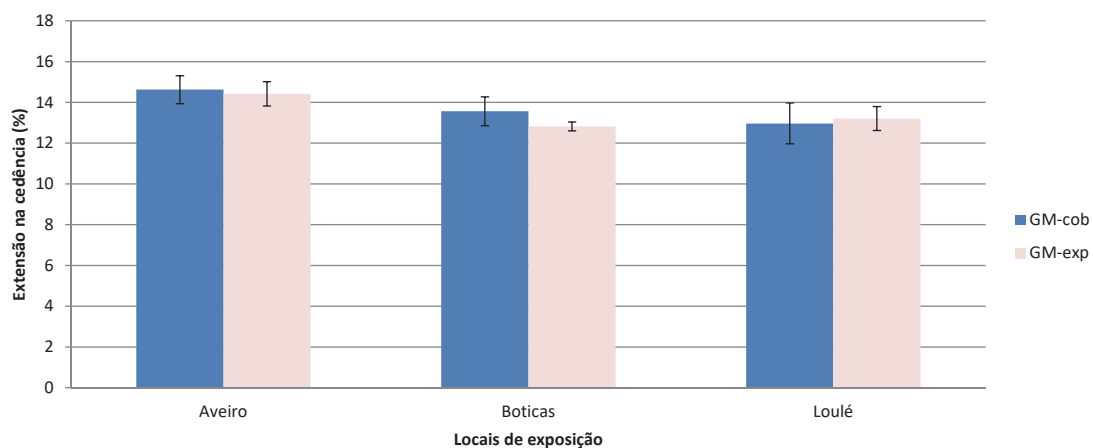


Fig. 14 – Comparação da extensão na cedência entre geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

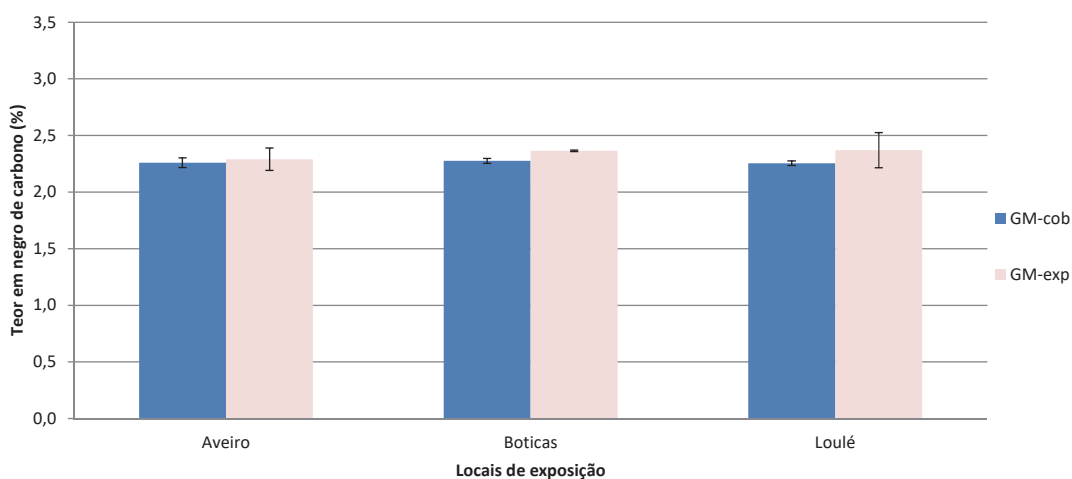


Fig. 15 – Comparação do teor em negro de carbono entre geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

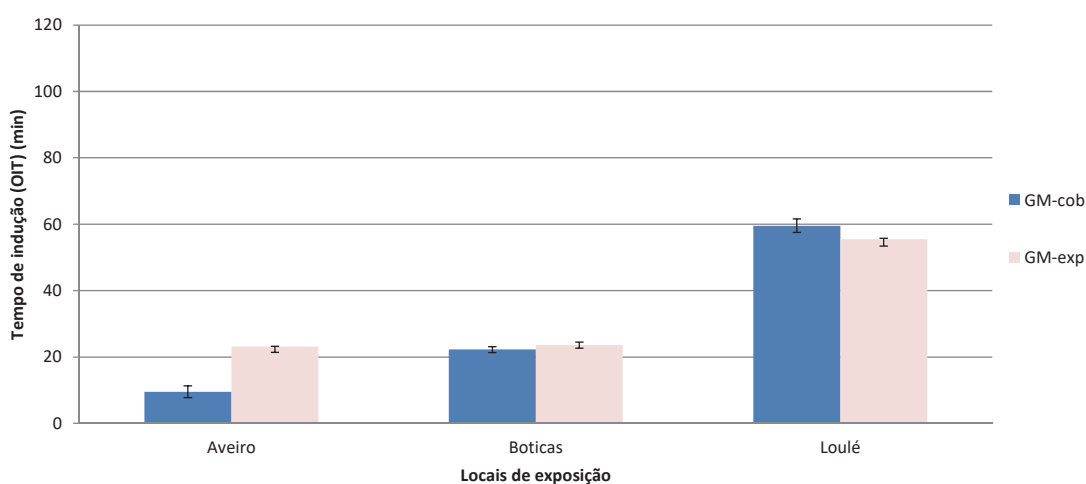


Fig. 16 – Comparação do tempo de indução à oxidação entre geomembranas expostas com e sem geotêxtil de cobertura.

Em suma, para a massa volúmica e tempo de indução à oxidação os resultados não apresentaram uma tendência. Para o índice de fluidez, a resistência à tração na cedência, a extensão na cedência e o teor em negro de carbono os resultados obtidos para as GM-cob e GM-exp foram semelhantes. Em termos gerais, não é possível confirmar a proteção proporcionada pelo geotêxtil por ainda não serem detetáveis alterações significativas na maior parte das propriedades estudadas das geomembranas expostas sem geotêxtil.

4 – CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou um trabalho experimental realizado com vista a estudar a evolução das propriedades de cinco geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) expostas às condições climáticas durante 12 anos, em várias regiões geográficas de Portugal, com o objetivo de analisar os seguintes aspetos: (i) a influência da exposição sobre diferentes geomembranas de polietileno de alta densidade; (ii) a influência da radiação ultravioleta sobre geomembranas expostas em locais com distintos índices de UV; e (iii) a influência do geotêxtil de proteção às geomembranas. As propriedades avaliadas foram a massa volúmica, o índice de fluidez, a resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, o teor em negro de carbono e o tempo de indução à oxidação.

A influência da exposição às condições climáticas sobre diferentes geomembranas foi analisada mediante a comparação entre os resultados obtidos para as geomembranas expostas e os valores das propriedades iniciais das mesmas geomembranas. Verificou-se que a exposição às condições climáticas afetou, sobretudo, a massa volúmica e o tempo de indução à oxidação. A massa volúmica aumentou, enquanto o tempo de indução diminuiu significativamente com a exposição às condições climáticas.

A influência do índice UV foi estudada através da comparação entre os resultados obtidos para as geomembranas expostas em locais com diferentes índices UV. Verificou-se que o aumento do índice UV influenciou os resultados da resistência à tração e extensão na cedência e do tempo de indução à oxidação. A resistência à tração e a extensão na cedência aumentaram e o tempo de indução à oxidação diminuiu com o aumento do índice UV.

A influência do geotêxtil de proteção às geomembranas foi avaliada pela comparação entre os resultados obtidos para as amostras expostas com e sem geotêxtil de cobertura. Verificou-se que para a massa volúmica e tempo de indução à oxidação os resultados não apresentaram uma tendência geral. Para o índice de fluidez, a resistência à tração na cedência, a extensão na cedência e o teor em negro de carbono, os resultados foram semelhantes para amostras expostas com e sem geotêxtil.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D1238. *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D1505. *Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D1603. *Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- 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.
- Baleki, R.; Sanders, B.; Steele, T.; Eng, J.; Vitarelli, G. (2010). *Characterising Long-Term UV Stabilization of Geomembranes under Different Environmental Conditions*. Proceedings of 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 895-898.
- Barroso, M.; Lopes, M. G. (2010). *Integridade das Geomembranas: Influência da Exposição aos Agentes Atmosféricos*. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, 26-29 Abril (CD-ROM).
- Barroso, M.; Brazão, C.; Lopes, M. G. (2004). *Estudo da Resistência Mecânica das Soldaduras por Fusão de Geomembranas de Polietileno de Alta Densidade Expostas aos Raios Solares*. II Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Aveiro, Portugal, pp. 305-316.
- Barroso, M.; Lopes, M. G.; Dores, R.; Coimbra, L. (2012). *Integrity of HDPE Geomembranes: Effect of Weather Exposure on the Mechanical Properties of Seams*. Proceedings of GeoAmericas 2012 - Second Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, Lima, Peru, May 2012, 9 p.
- Carneiro, J. R. C. (2009). *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental. A importância da incorporação de aditivos químicos*. Dissertação de doutoramento, FEUP, Porto, 534 p.
- Geosynthetic Research Institute (GRI) - GM13 (2016). *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 21/03/2017
- Halse, Y.; Wiertz, J.; Rigo, J. M.; Cazzuffi, D. A. (1991). *Chemical Identification Methods Used to Characterize Polymeric Geomembranes*. RILEM: Report of Technical Committee 103, pp. 316-335.
- Hsuan, Y. G.; 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.; Koerner, G. R (2011). *Geomembrane lifetime prediction: unexposed and exposed conditions*. GRI White Paper No.6. Original: 7 June 2005; updated: 8 February 2011.
- Koerner, R. M.; Hsuan, Y. G.; Koerner, G. R (2017). *Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes*. Geosynthetics International, 25, No.2, pp. 198-212.
- Lodi, P. C. (2003). *Aspectos da degradação de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Policloreto de Vinila (PVC)*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, 284 p.
- Lodi, P. C.; Bueno, B. S.; Zornberg, J. G. (2007). *Degradação de Geomembranas Poliméricas após Exposição à Intempérie*. VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO'2007 e o V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – GEOSSINTÉTICOS'2007, 18 e 21 de Junho Recife – PE, Brasil.
- Lopes, M. G.; Barroso, M. (2004). *Mechanical Performance of HDPE Geomembrane Seams after Sunlight Exposure*. Proceedings of EuroGeo 3, Munich, Germany, 1-3 March 2004, Vol. 1, pp. 425-428.

- Lopes, M. L.; Monteiro, A. V. (1999). *Estudo da acção de agentes de degradação no comportamento à tracção de geomembranas*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – Geotecnia, Nº 87, pp. 33-52.
- Nunes, L. F.; Cunha, S.; Silva, A.; Carvalho, F.; Henriques, D. (2013). *Processamento e análise de dados IUV sobre Portugal, obtidos por satélite*. 8º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG - 14º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Ericeira, Portugal.
- Peggs, I.D. (2008). *How long will my liner last?* Geosynthetics, www.geosyntheticsmagazine.com/2008/10/01/how-long-will-my-liner-last/ acedido em 03/03/2017
- Reis, A. (2016). *Geossintéticos em Vias de Comunicação: Influência das Condições Climáticas*. Dissertação de Mestrado, ISEL, 89 p.
- Reis, A.; Barroso, M.; Lopes, M. G. (2016). *Envelhecimento de geomembranas de PEAD expostas às condições climáticas durante 12 anos*. 15.º Congresso Nacional de Geotecnia, 19-23 junho, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
- Rowe, R. K.; Ewais, A. M. R. (2015). *Ageing of Exposed Geomembranes at Locations with Different Climatological Conditions*. Canadian Geotechnical Journal, 52(3), pp. 326-343.
- Rowe, R. K.; Chappel, M. J.; Brachman, R. W. I.; Take, W. A. (2012). *Field monitoring of geomembrane wrinkles at a composite liner test site*. Canadian Geotechnical Journal, 49(10): 1196–1211.
- Rowe, R. K.; Rimal, S.; Sangam, H. P. (2009). *Ageing of HDPE Geomembrane Exposed to Air, Water and Leachate at Different Temperatures*. Geotextiles and Geomembranes, 27, pp. 137-151.
- Rowe, R. K.; Sangam, H. P.; Lake, C. B. (2003). *Evaluation of an HDPE Geomembrane after 14 years as a Leachate Lagoon Liner*. Canadian Geotechnical Journal, Volume 40(3), pp. 536-550.
- Tarnowski, C.; 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.
- Yako, M. A.; Koerner, G. R.; Koerner, R. M.; Hsuan, Y. G. (2010). *Case History of a 20-year Old Exposed HDPE Surface Impoundment Liner*. Proceedings of 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 805-808.