



**Geossintéticos em vias de comunicação:
Influência das condições climáticas**

AMÉLIA DA CONCEIÇÃO NEVES DOS REIS
Licenciada em Engenharia Civil

**Trabalho de Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil na Área de Especialização de Vias de Comunicação e
Transportes**

Orientadores:

Doutora Madalena da Conceição Pereira Barroso, Investigadora Auxiliar (LNEC)

Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes, Prof. Coordenadora Principal (IPL/ISEL)

Júri:

Presidente: Mestre Paulo José de Matos Martins, Prof. Adjunto, Especialista (IPL/ISEL)

Vogais:

Doutora Madalena da Conceição Pereira Barroso, Investigadora Auxiliar (LNEC)

Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa, Prof. Coordenadora (IPL/ISEL)

GEOSSINTÉTICOS EM VIAS DE COMUNICAÇÃO: INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Resumo

Em vias de comunicação, os geossintéticos são utilizados em diferentes aplicações, nomeadamente em estradas, em caminhos-de-ferro, em obras de proteção de taludes, etc.. Algumas destas aplicações são inovadoras, como por exemplo a utilização de geomembranas na proteção de taludes rodoviários, levantando novos desafios, entre eles a evolução das propriedades deste geossintético quando exposto às condições climáticas a longo prazo.

Com o objectivo de avaliar a evolução das propriedades das geomembranas de polietileno de alta densidade expostas às condições climáticas durante aproximadamente 12 anos, realizou-se um estudo paramétrico, de natureza experimental. Os parâmetros em análise incluíram: (i) amostras de geomembranas fornecidas por fabricantes diferentes e expostas em várias regiões de Portugal, com vista a estudar a influência das condições climáticas sobre materiais fabricados a partir de diferentes matérias-primas; (ii) amostras de geomembrana fornecidas pelo mesmo fabricante e expostas em locais com condições climáticas diferentes, com o objetivo de verificar a influência do índice ultravioleta (IUV); (iii) amostras de geomembranas expostas com e sem cobertura de geotêxtil, com vista a avaliar a eficácia do geotêxtil como proteção às geomembranas; e (iv) amostras de geomembranas não-expostas, para servir como referência. O trabalho teve, também, por objetivo comparar as propriedades das geomembranas expostas com os requisitos mínimos presentemente preconizados pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI), a fim de verificar se, após 12 anos de exposição, estas ainda cumprem os requisitos estabelecidos por este organismo. As propriedades estudadas 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.

Verificou-se que as propriedades das diferentes geomembranas foram influenciadas pela exposição às condições climáticas, sobretudo, o tempo de indução à oxidação e massa volúmica. Para as geomembranas fornecidas pelo mesmo fabricante, expostas em locais com diferentes condições climáticas, apenas uma delas parece ter sido influenciada pelo IUV. Verificou-se, também, que o geotêxtil de cobertura não foi eficaz na proteção das geomembranas contra os efeitos das condições climáticas. Os resultados obtidos indicam que as geomembranas expostas durante 12 anos ainda cumprem os requisitos mínimos indicados pelo GRI, à exceção do tempo de indução à oxidação.

Da análise integrada dos resultados, conclui-se que as geomembranas expostas se encontram na Fase A de degradação, designada por depleção de antioxidantes, pelo facto de ainda subsistirem antioxidantes nas geomembranas expostas.

Palavras Chave: Vias de comunicação; Geossintéticos; Geomembranas; Ensaio Laboratoriais;
Durabilidade; Degradação.

GEOSYNTHETICS IN ROADS: INFLUENCE OF THE WEATHER CONDITIONS

Abstract

In roadways, the geosynthetics are used in different applications, namely in paved or unpaved roads, in railways, in slope protection, among others. Some of these applications are innovative, such as the use of geomembranes in protecting road embankments, give rise to new challenges, including the evolution of the properties of this type of geosynthetic when exposed to weather conditions in the long term.

To study the evolution of the properties of high density polyethylene geomembranes exposed to weather conditions for about 12 years, a parametric study was carried out. Parameters under study included: (i) geomembrane samples provided by different manufacturers and exposed in various regions of Portugal, in order to study the influence of weather conditions on materials manufactured from different raw materials; (ii) geomembrane samples supplied by the same manufacturer and exposed at locations with different weather conditions, in order to verify the influence of ultraviolet index (UVI) on materials manufactured from the same raw material; (iii) exposed geomembrane samples, covered with and without geotextile, to evaluate the effectiveness of geotextile as protection of geomembranes; (iv) and unexposed geomembrane samples to serve as reference. Other goal of this work was to compare the properties of exposed geomembranes with the minimum requirements currently recommended by the Geosynthetic Research Institute (GRI) in order to verify that, after 12 years of exposure, they still meet those requirements. The properties studied were: density, melt flow index, tensile properties, carbon black content, and oxidative induction time. Results have shown that the properties of the different geomembranes exposed to weather conditions presented some degradation, especially in the oxidative induction time and density. For geomembranes manufactured from the same raw material, exposed at locations with different weather conditions, only one of them appears to have been influenced by UVI, in particular as regards the oxidative induction time and density. It has been found that cover geotextile was not effective in protecting geomembranes against the effects of weather conditions. The results have indicated that the exposed geomembranes for 12 years even meet the minimum requirements established by GRI, except for the oxidative induction time.

The integrated analysis of the results, it is concluded that the geomembranes are exposed in Phase A of degradation, referred to as depletion of antioxidants, the antioxidants that still subsist on the exposed geomembranes.

Keywords: Roads; Geosynthetics; Geomembranes; Laboratory Tests; Exposure to Weather Conditions; Durability.

Agradecimentos

A presente dissertação foi elaborada no Núcleo de Geologia de Engenharia e de Ambiente (NGEA) do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e destina-se à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL).

O trabalho realizado só foi possível com a ajuda e contribuição de diversas pessoas e entidades, pelo que expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

À minha orientadora Doutora Madalena Barroso, pela sua disponibilidade e orientação, pela partilha de conhecimentos, pelo incentivo e pelas palavras amigas que sempre me deu nos momentos mais difíceis.

À Doutora Maria da Graça Lopes, pela sua disponibilidade e incentivo demonstrados e pelas suas sugestões de melhoria.

À Doutora Laura Caldeira, Diretora do Departamento de Geotecnia do LNEC, pelo incentivo e apoio.

Ao Doutor João Paulo Serra, pelo seu incentivo e apoio.

À Filomena Nobre e ao Nuno Silvestre pela simpatia e disponibilidade.

À minha amiga Susana Almeida pela amizade, camaradagem, incentivo e motivação que me dispensou ao longo destes meses.

À minha amiga Filipa Sousa, pela paciência e incentivo.

Aos meus colegas de trabalho que sempre me apoiaram e motivaram e pela paciência demonstrada, em especial o António Cardoso, o Joaquim Timóteo, a Dina Brilhante e a Paula Moreira.

Ao meu marido e à minha filha pela paciência que tiveram e pelo incentivo e motivação constante que me dispensaram.

Aos meus pais, por tudo o que me proporcionaram.

Por fim, a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho e que me estimularam tanto emocional como intelectualmente.

Muito Obrigada.

Abreviaturas e símbolos

GM – Geomembrana

GM-arq – Geomembrana arquivo

GM-cob – Geomembrana coberta

GM-exp – Geomembrana exposta

GC - Grau de cristalinidade

GRI – Geosynthetic Research Institute

IM - Índice de fusão

OIT – Tempo de indução à oxidação

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PVC - Policloreto de vinilo

SCR – resistência à fissuração

IUV – Índice ultra violeta

MFI – Índice de fluidez

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento e objetivo do trabalho	1
1.2	Estrutura da dissertação	2
2	Síntese de conhecimentos	5
2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Tipos de geossintéticos	5
2.3	Funções dos geossintéticos.....	9
2.4	Aplicações dos geossintéticos em vias de comunicação	12
2.5	Geomembranas	15
2.5.1	Polímeros.....	15
2.5.1.1	Conceito.....	15
2.5.1.2	Classificação.....	17
2.5.1.3	Cristalinidade	17
2.5.1.4	Aditivos	18
2.5.2	Propriedades das geomembranas.....	19
2.5.2.1	Caracterização geral	19
2.5.2.2	Massa volúmica	20
2.5.2.3	Índice de fluidez.....	21
2.5.2.4	Resistência à tração e extensão	21
2.5.2.5	Teor em negro de carbono	23
2.5.2.6	Tempo de indução à oxidação (OIT).....	23
2.5.3	Degradação	24
2.6	Revisão bibliográfica.....	29
2.7	Considerações finais.....	35
3	Trabalho experimental.....	37
3.1	Considerações iniciais	37
3.2	Amostras e sua localização	37
3.3	Métodos de ensaio.....	41
3.3.1	Programa de ensaios.....	41
3.3.2	Ensaio de determinação da massa volúmica	42
3.3.3	Ensaio de determinação da resistência à tração e extensão na cedência e na rotura.....	44
3.3.4	Ensaio de determinação do índice de fluidez.....	46
3.3.5	Ensaio de determinação do teor em negro de carbono	48
3.3.6	Ensaio de determinação do tempo de indução à oxidação (OIT)	49
3.4	Considerações finais.....	50
4	Apresentação dos resultados.....	52
4.1	Considerações iniciais	52
4.2	Massa volúmica	52
4.3	Resistência à tração e extensão na cedência e na rotura.....	54
4.4	Determinação do índice de fluidez	58
4.5	Teor em negro de carbono	59
4.6	Tempo de indução (OIT).....	61
4.7	Considerações finais.....	62
5	Análise de resultados	64

5.1	Considerações iniciais	64
5.2	Valores de referência	64
5.3	Influência da exposição às condições climática sobre as diferentes geomembranas	66
5.4	Influência do geotêxtil de cobertura	70
5.5	Influência do índice UV sobre GMs expostas em diferentes locais.....	73
5.6	GM exposta <i>versus</i> critérios do GRI	77
5.7	Considerações finais.....	80
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	82
	Referências Bibliográficas	86

Índice de figuras

Figura 2.1 – Geotêxteis.	6
Figura 2.2 – Geogrelhas.	6
Figura 2.3 – Georredes.	7
Figura 2.4 – Geotubos.	7
Figura 2.5 – Geoespumas.	7
Figura 2.6 – Geomembranas.	8
Figura 2.7 – Geocompósitos.	8
Figura 2.8 – Função de reforço.	9
Figura 2.9 – Função de separação.	9
Figura 2.10 – Função de filtragem.	10
Figura 2.11 – Função de drenagem.	10
Figura 2.12 – Função de barreira.	10
Figura 2.13 – Função de controlo de erosão (adaptado de Lopes e Lopes, 2010)	11
Figura 2.14 – Aplicação de geossintéticos em obras de caminho-de-ferro (IGS – Portugal, 2014).	12
Figura 2.15 – Geossintéticos em estradas não pavimentadas (IGS – Portugal, 2014).	13
Figura 2.16 – Geossintéticos em estradas pavimentadas (IGS – Portugal, 2014).	13
Figura 2.17 – Aterro reforçado com geossintéticos na autoestrada A32.	14
Figura 2.18 – Aplicação de geomembrana em “banquetas vivas” na Autoestrada A21 – Malveira (antes e após reabilitação do talude)	14
Figura 2.19 – Aplicação de geomembrana na Autoestrada A10 em taludes de escavação em margas para evitar a degradação dos materiais expostos às condições atmosféricas (Cardoso, 2014).	15
Figura 2.20 – Representação da microestrutura dos polímeros: a) termoplásticos b) elastómeros c) termoendurecidos, (adaptado de Dantas e Ramalho (2011)).	17
Figura 2.21 – Representação das estruturas cristalina e amorfa dos polímeros (adaptado de Greenwood <i>et al.</i> , 2012).	18
Figura 2.22 – Curvas típicas força-extensão de geossintéticos (adaptado de Lopes & Lopes, 2010).	22
Figura 2.23 – Comportamento Força/Extensão de Geomembranas de PEAD (Lodi, 2003).	22
Figura 2.24 – Esquema do registo gráfico desde a adição de O ₂ até à oxidação total (ensaio OIT).	24
Figura 2.25 – Registo da determinação do tempo de oxidação indutiva pelo método das tangentes (adaptado de Lodi, 2003).	24
Figura 2.26 – Fases de degradação química devido a oxidação de geomembranas de polietileno de alta densidade.	25
Figura 2.27 – Fases de oxidação do polietileno.	26
Figura 2.28 – Distribuição do valor médio do índice UV _{CL} para o período de 2003-2012 (Nunes, <i>et al.</i> , 2013)	28
Figura 2.29 – Localização das geomembranas ensaiadas (Rowe <i>et al.</i> , 2003).	29
Figura 3.1 – Representação esquemática das amostras expostas e não expostas.	37
Figura 3.2 – Locais de exposição das geomembranas no país.	38
Figura 3.3 – Viana do Castelo: amostra exposta sobre uma cobertura.	38
Figura 3.4 – Valença: amostra exposta no solo.	38
Figura 3.5 – Vila Nova de Gaia: amostra exposta sobre um painel.	39
Figura 3.6 – Aveiro: amostra exposta sobre uma cobertura.	39
Figura 3.7 – Figueira da Foz: amostra exposta sobre uma cobertura.	39

Figura 3.8 – Boticas: amostra exposta no talude.....	39
Figura 3.9 – Bigorne: amostra exposta sobre uma cobertura.....	39
Figura 3.10 – Loulé: amostra exposta sobre uma cobertura.....	39
Figura 3.11 – Equipamento de ensaio - Coluna de gradiente de densidades.....	43
Figura 3.12 – Forma e dimensões dos provetes segundo a norma ASTM D6693.....	44
Figura 3.13 – Equipamento de ensaio: Prensa.....	45
Figura 3.14 – Provetes antes e após ensaio, na prensa.....	45
Figura 3.15 – Curva experimental do ensaio de determinação da resistência à tração e extensão na rotura de uma geomembrana.....	46
Figura 3.16 – Equipamento de ensaio - Plastómetro de extrusão CEAST.....	47
Figura 3.17 – Êmbolo com carga amovível.....	47
Figura 3.18 – Provete antes e após ensaio no plastómetro de extrusão.....	47
Figura 3.19 – Equipamento para determinação do teor em negro de carbono.....	48
Figura 3.20 – Mufla para oxidação do negro de carbono.....	48
Figura 3.21 – Provete para o ensaio de determinação do teor em negro de carbono.....	49
Figura 3.22 – Colocação de um provete na mufla.....	49
Figura 3.23 – Calorímetro diferencial de varrimento, marca SETARAM, modelo DSC92.....	50
Figura 4.1 – Massa volúmica – GM em arquivo e <i>GM-cob</i>	53
Figura 4.2 – Massa volúmica – <i>GM-exp</i>	53
Figura 4.3 – Resistência à tração na cedência – <i>GM-arq</i> e <i>GM-cob</i>	54
Figura 4.4 – Extensão na cedência – <i>GM-arq</i> e <i>GM-cob</i>	55
Figura 4.5 – Resistência à tração na rotura – <i>GM-arq</i> e <i>GM-cob</i>	55
Figura 4.6 – Extensão na rotura – <i>GM-arq</i> e <i>GM-cob</i>	55
Figura 4.7 – Resistência à tração na cedência - <i>GM-exp</i>	56
Figura 4.8 – Extensão na cedência – <i>GM-exp</i>	57
Figura 4.9 – Resistência à tração na rotura - <i>GM-exp</i>	57
Figura 4.10 – Extensão na rotura – <i>GM-exp</i>	57
Figura 4.11 – Índice de fluidez – GM em arquivo e <i>GM-cob</i>	58
Figura 4.12 – Índice de fluidez – <i>GM-exp</i>	59
Figura 4.13 – Teor em negro de carbono – <i>GM-arq</i> em e <i>GM-cob</i>	60
Figura 4.14 – Teor em negro de carbono – <i>GM-exp</i>	60
Figura 4.15 – Tempo de indução à oxidação – GM em arquivo e <i>GM-cob</i>	61
Figura 4.16 – Tempo de indução à oxidação – <i>GM-exp</i>	61
Figura 5.1 – Comparação da massa volúmica da <i>GM-exp</i> com os valores de referência.....	66
Figura 5.2 – Comparação do índice de fluidez da <i>GM-exp</i> com os valores de referência.....	66
Figura 5.3 – Comparação da resistência à tração na cedência da <i>GM-exp</i> com os valores de referência.....	67
Figura 5.4 – Comparação da extensão na cedência da <i>GM-exp</i> com os valores de referência.....	67
Figura 5.5 – Comparação do teor em negro de carbono da <i>GM-exp</i> com os valores de referência.....	67
Figura 5.6 – Comparação do tempo de indução à oxidação da <i>GM-exp</i> com os valores de referência.....	68
Figura 5.7 – Comparação da massa volúmica entre <i>GM-cob</i> e a <i>GM-exp</i> nos vários locais de exposição.....	70
Figura 5.8 – Comparação do índice de fluidez entre <i>GM-cob</i> e da <i>GM-exp</i> nos vários locais.....	70
Figura 5.9 – Comparação da resistência à tração na cedência entre <i>GM-cob</i> e a <i>GM-exp</i> nos vários locais.....	71
Figura 5.10 – Comparação da extensão na cedência entre <i>GM-cob</i> e a <i>GM-exp</i> nos vários locais.....	71

Figura 5.11 – Comparação do teor em negro de carbono entre <i>GM-cob</i> e a <i>GM-exp</i> nos vários locais.	71
Figura 5.12 – Comparação do tempo de indução à oxidação (OIT) entre <i>GM-cob</i> e a <i>GM-exp</i> nos vários locais.....	72
Figura 5.13 – Comparação da massa volúmica das GM-A e GM-B nas condições de <i>GM-exp</i> nos diferentes locais de exposição.	73
Figura 5.14 – Comparação do índice de fluidez das GM-A e GM-B nas condições de <i>GM-exp</i> nos diferentes locais de exposição.	74
Figura 5.15 – Comparação da resistência à tração na cedência das GM-A e GM-B nas condições de <i>GM-exp</i> nos diferentes locais de exposição.....	74
Figura 5.16 – Comparação da extensão na cedência das GM-A e GM-B nas condições de <i>GM-exp</i> nos diferentes locais de exposição.	74
Figura 5.17 – Comparação do teor em negro de carbono das GM-A e GM-B nas condições de <i>GM-exp</i> nos diferentes locais de exposição.	75
Figura 5.18 – Comparação do tempo de indução à oxidação das GM-A e GM-B nas condições de <i>GM-exp</i> nos diferentes locais de exposição.....	75
Figura 5.19 – Comparação da massa volúmica entre <i>GM-exp/GRI</i> (GM13) nos vários locais.	77
Figura 5.20 – Comparação da propriedade resistência à tração na cedência entre <i>GM-exp/GRI</i> (GM13) nos vários locais.	78
Figura 5.21 – Comparação da propriedade extensão na cedência entre <i>GM-exp/GRI</i> (GM13) nos vários locais.	78
Figura 5.22 – Comparação da propriedade teor em negro de carbono entre <i>GM-exp/GRI</i> (GM13) nos vários locais.	78
Figura 5.23 – Comparação da propriedade tempo de indução à oxidação (OIT) entre <i>GM-exp/GRI</i> (GM13) nos vários locais.	79

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Aplicações de geossintéticos em vias de comunicação (adaptado de Lopes e Lopes, 2010).	11
Quadro 2.2 – Abreviaturas e designação de polímeros.	16
Quadro 2.3 – Ensaio em geomembranas (adaptado de Lodi, 2003)	19
Quadro 2.4 – Variação das diferentes propriedades do PE com o aumento da densidade (Lodi, 2003)	20
Quadro 2.5 – Classificação qualitativa para os vários níveis do índice UV (Nunes <i>et al.</i> , 2013).	27
Quadro 2.6 – Relação entre o índice UV e a temperatura da geomembrana de cor preta exposta (adaptado de Rowe & Ewais, 2014).	28
Quadro 2.7 – Normas ASTM (adaptado de Rowe <i>et al.</i> , 2003).	29
Quadro 2.8 – Resumo das características físicas, químicas e mecânicas das amostras (adaptado de Rowe <i>et al.</i> , 2003).	30
Quadro 2.9 – Projetos de exposição de geomembranas de PEAD (adaptado de Tarnowski & Baldauf, 2012).	31
Quadro 2.10 – Teor de antioxidantes em diferentes camadas da GMs expostas em dois locais na Alemanha e com diferentes tempos de exposição (adaptado de Tarnowski & Baldauf, 2012).	31
Quadro 2.11 – Relação entre a vida útil de uma GM sujeita a diferentes temperaturas de serviço com a vida útil para uma temperatura de 85°C (adaptado de Rowe & Ewais, 2014).	33
Quadro 2.12 – Resultados do MFR (adaptado de Lodi <i>et al.</i> , 2007).	34
Quadro 2.13 – Resultados do OIT (adaptado de Lodi <i>et al.</i> , 2007).	34
Quadro 3.1 – Resumo das principais características das geomembranas de PEAD.	40
Quadro 3.2 – Lista de ensaios realizados para caracterização das geomembranas.	41
Quadro 3.3 – Relação de ensaios realizados para caracterização das geomembranas.	42
Quadro 5.1 – Resultados dos ensaios de controlo de fabrico, realizados no LNEC e valores indicados nas fichas técnicas.	65
Quadro 6.1 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade massa volúmica nos diferentes locais.	93
Quadro 6.2 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade índice de fluidez nos diferentes locais.	93
Quadro 6.3 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade teor em negro de carbono nos diferentes locais.	93
Quadro 6.4 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade as propriedades resistência à tração e extensão na cedência e na rotura nos diferentes locais.	94
Quadro 6.5 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade tempo de indução à oxidação nos diferentes locais.	95

1 | INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e objetivo do trabalho

Em vias de comunicação os geossintéticos são materiais utilizados em diferentes aplicações, nomeadamente em estradas pavimentadas ou não pavimentadas, em caminhos-de-ferro, em obras de contenção de taludes, entre outras.

Os geossintéticos podem reforçar os solos ou substituir os materiais de construção tradicionais.

De acordo com Koerner (2005), as razões para a aplicação destes materiais ter vindo a crescer muito rapidamente deve-se à sua rápida instalação, à existência de um controlo de qualidade apertado na produção dos mesmos, dos custos serem competitivos com os outros materiais de construção.

Em Portugal, os geossintéticos têm sido usados em aplicações inovadoras, como é o caso da autoestrada A21, onde foi introduzida recentemente uma nova técnica denominada “banqueta viva”. Esta consiste na colocação de uma geomembrana subjacente a uma camada de terra revestida com vegetação, cujo objetivo é reduzir a infiltração da água que se acumula entre as banquetas e os panos de talude, prescindindo do betão ou de outros materiais inertes para a impermeabilização (Estradas.pt, 2015). Foram, igualmente, utilizados na impermeabilização/proteção de taludes rodoviários, na autoestrada A10 (Arruda dos Vinhos/Carregado, Formação da Abadia), onde foi aplicada uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), tal como referido por Cardoso (2014).

Por estas aplicações serem inovadoras no domínio das vias de comunicação levantam novos desafios, entre eles a evolução das propriedades destes materiais quando expostos às condições climáticas a longo prazo.

A evolução das propriedades das geomembranas em PEAD expostas às condições climáticas tem sido objeto de estudo no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), desde 1999, mas centrado na evolução da resistência mecânica das soldaduras entre painéis adjacentes (Barroso & Lopes, 2010).

Com o objetivo de dar continuidade ao referido estudo e, simultaneamente, alargar o seu âmbito não só às soldaduras mas também aos painéis das geomembranas propriamente ditas, foram recolhidos provetes, após, aproximadamente, 12 anos de exposição das amostras, para realização de ensaios laboratoriais, como se pode verificar no Capítulo 3. Os ensaios incidiram sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas da geomembrana, nomeadamente os seguintes: massa volúmica, resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, índice de fluidez, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação.

Pretende-se com o presente trabalho avaliar a evolução das propriedades das geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) expostas às condições climáticas, em várias regiões geográficas de Portugal, em diferentes condições, designadamente, cobertas ou não com geotêxtil.

A colocação de amostras em diferentes locais do país visou estudar a influência das radiações UV características das diferentes regiões de Portugal sobre as propriedades das geomembranas produzidas por diferentes fabricantes expostas em locais com diferentes condições climáticas. A cobertura das amostras com geotêxtil teve por objetivo estudar a importância deste geossintético na proteção das geomembranas expostas.

Outro objetivo do presente trabalho é comparar os valores das diferentes propriedades das geomembranas com os requisitos mínimos para garantir o seu desempenho, presentemente preconizados pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI) - GM13, com vista a verificar se, após 12 anos de exposição, estes materiais ainda cumprem os valores mínimos preconizados por este Instituto.

O estudo da influência da exposição às condições climáticas foi realizado mediante a comparação entre os resultados dos ensaios laboratoriais realizados sobre as amostras de geomembranas fabricadas por diferentes fabricantes, expostas e sobre amostras não-expostas (de referência). **Estrutura da dissertação**

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. Seguidamente apresenta-se uma breve descrição do seu conteúdo e da organização da mesma.

Capítulo 1 – Introdução.

Na introdução procura-se situar o tema no âmbito da Engenharia Civil, definir os objetivos do trabalho e apresentar a organização da dissertação.

Capítulo 2 – Síntese de conhecimentos.

O capítulo 2 refere-se à síntese de conhecimentos, incluindo apresentação dos tipos de geossintéticos, as suas funções, as principais aplicações em vias comunicação, bem como a descrição das geomembranas, em termos de polímeros, propriedades e degradação. Inclui, igualmente, a revisão dos trabalhos já realizados neste domínio.

Capítulo 3 – Trabalho experimental.

No capítulo 3 descrevem-se as condições de exposição das amostras, a sua localização geográfica em Portugal e são apresentadas as características das geomembranas ensaiadas. Descrevem-se também os métodos de ensaios e são mencionadas as respetivas normas de ensaio.

Capítulo 4 – Apresentação de resultados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados sob amostras de geomembranas nas condições de exposição descritas no capítulo anterior.

Capítulo 5 – Análise de resultados.

O capítulo 5 é dedicado à interpretação dos resultados. Realiza-se uma análise preliminar com o objetivo de definir quais os valores das diferentes propriedades a adotar como referência, discute-se a influência da exposição às condições climáticas sobre as diferentes propriedades das geomembranas expostas com e sem cobertura de geotêxtil, analisa-se a influência da radiação UV, através da comparação entre o índice de UV e as propriedades obtidas para as geomembranas expostas nos diferentes locais de exposição. Por fim, comparam-se os valores das diferentes propriedades das geomembranas expostas com os requisitos mínimos preconizados pelo *Geosynthetic Research Institute*.

Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos no âmbito deste tema.

2 | Síntese de conhecimentos

2.1 Considerações iniciais

Existe uma grande variedade de geossintéticos, que são utilizados em vias de comunicação, nomeadamente em estradas pavimentadas ou não pavimentadas, caminhos-de-ferro, obras de contenção de taludes, etc..

Seguidamente apresentam-se os diferentes tipos de geossintéticos, as suas funções e as principais aplicações em obras de engenharia civil. Apresentam-se também, de forma sucinta, os materiais mais utilizados no seu fabrico, as suas propriedades físicas e mecânicas, com vista a auxiliar/apoiar a compreensão do seu comportamento e a evolução das suas propriedades em consequência da exposição às condições climáticas.

Por fim apresenta-se uma revisão bibliográfica, com o estado atual do conhecimento sobre a influência das condições climáticas em geossintéticos em vias de comunicação.

2.2 Tipos de geossintéticos

O termo geossintético define um material, em que pelo menos um dos seus componentes é fabricado a partir de um polímero sintético, na forma de folha, tira ou estrutura tridimensional, sendo utilizado em contacto com o solo ou outros materiais em obras de engenharia civil (EN ISO 10318).

Os geossintéticos podem ser agrupados em duas famílias, os materiais permeáveis e as barreiras.

Entre os materiais permeáveis contam-se os geotêxteis, as geogrelhas, as georredes, os geotubos e as geoespumas.

Os geotêxteis são constituídos por fibras de polímeros sintéticos, são permeáveis e podem ser utilizados para filtragem, drenagem, proteção, separação e, também, para controlo de erosão. Na Figura 2.1 apresentam-se alguns exemplos de geotêxteis

As geogrelhas consistem numa grelha aberta e regular de elementos resistentes à tração, ligados entre si por extrusão, colagem ou entrelaçamento, cujas aberturas têm dimensões superiores às da superfície sólida da grelha formada pelos elementos constituintes e são usadas essencialmente para reforço, tal como se mostra na Figura 2.2.

As georredes são constituídas por duas séries de elementos paralelos que se cruzam segundo vários ângulos, tal como apresentado na Figura 2.3, formando uma estrutura plana aberta, sendo usadas para drenagem.

Os geotubos são utilizados para captação e drenagem de líquidos. Os tubos são cravados verticalmente no solo e as suas pontas inferiores ficam inseridas no solo abaixo do nível da água, servindo estes para conduzir os líquidos para fora da zona a drenar. A Figura 2.4 ilustra este tipo de material. Existem também drenos verticais que são constituídos por um núcleo vertical de PEAD, formado por canais, e envolvido por geotêxteis que funcionam como filtro deixando apenas a água passar para o seu interior.

As geospumas são formadas por blocos ou placas de poliestireno expandido que definem uma estrutura de baixa densidade. Das suas várias aplicações destacam-se, o isolamento térmico, o enchimento leve para aterros, ou como placa vertical compressível para reduzir a pressão de terras em muros de suporte rígidos. As geospumas são representadas na Figura 2.5.

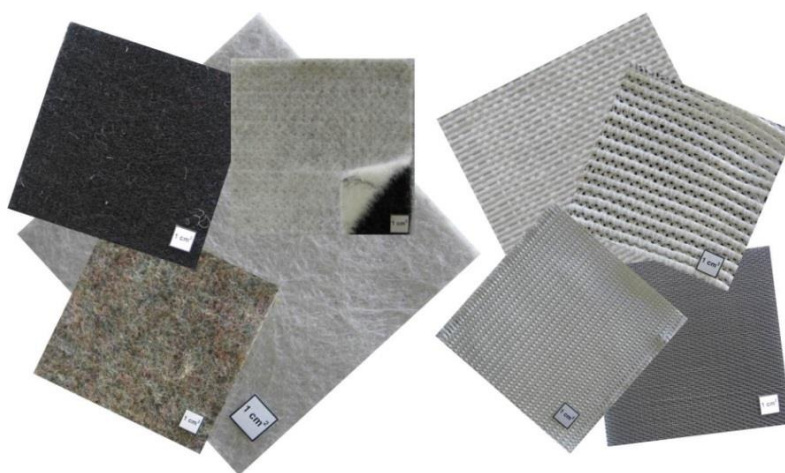


Figura 2.1 – Geotêxteis.

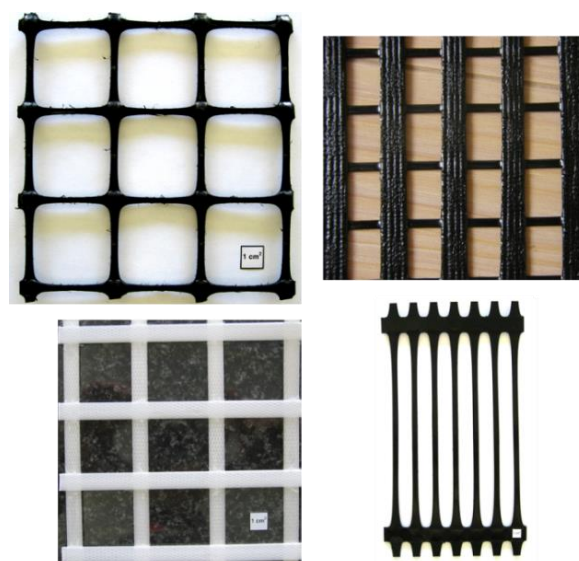


Figura 2.2 – Geogrelhas.

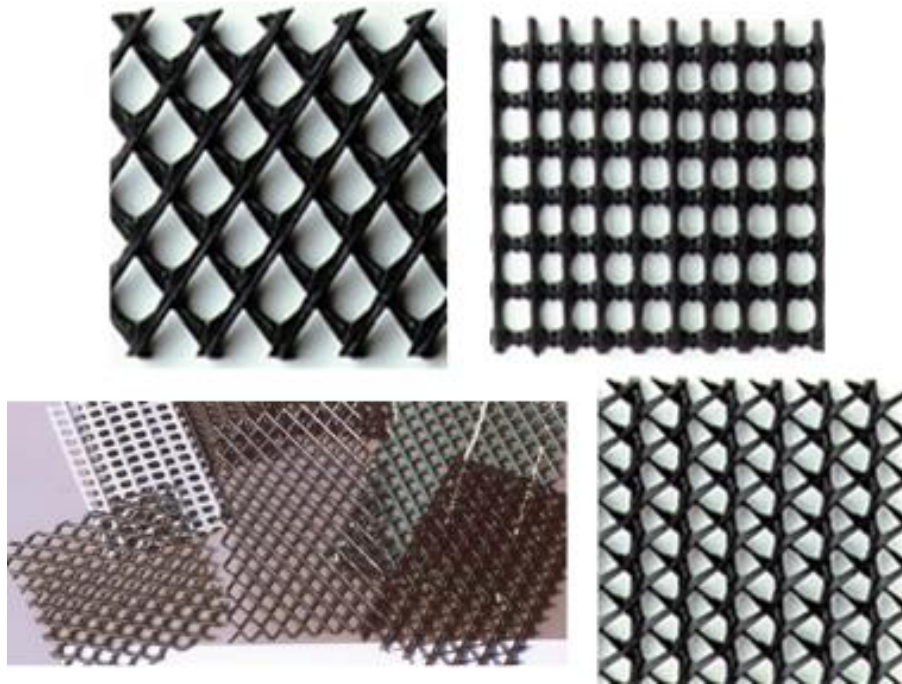


Figura 2.3 – Georredes.

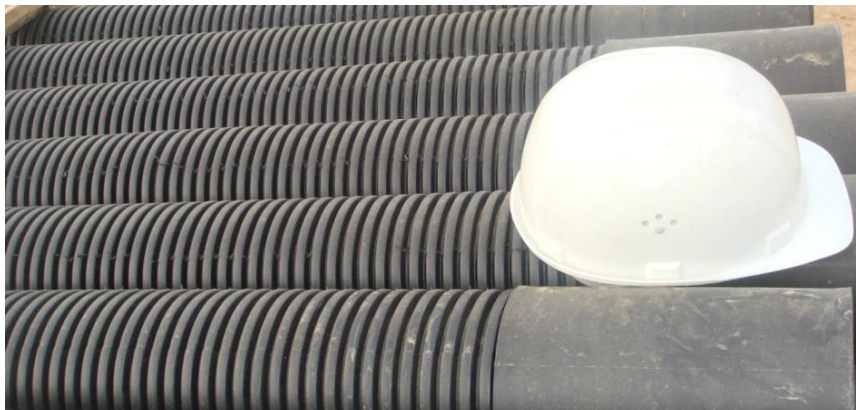


Figura 2.4 – Geotubos.

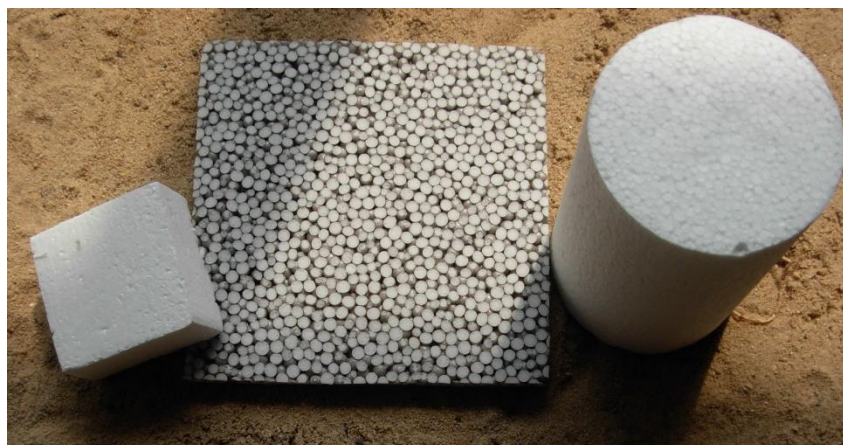


Figura 2.5 – Geoespumas.

Nas barreiras, incluem-se as barreiras geossintéticas poliméricas, geralmente designadas por geomembranas (GM), as barreiras geossintéticas betuminosas, tipicamente denominadas por tela asfáltica, e as barreias geossintéticas argilosas, comumente chamadas de geossintéticos bentoníticos, sendo de destacar, no âmbito do presente trabalho, as barreiras geossintéticas poliméricas. As barreiras geossintéticas poliméricas, são constituídas por materiais de reduzida permeabilidade, produzidos à base de polímeros, podendo ser usados para contenção de líquidos, gases e/ou vapores (Figura 2.6).

De referir que, embora o termo indicado na norma NP EN ISO 10318:2010 sobre terminologia dos geossintéticos seja barreiras geossintéticas poliméricas, neste trabalho estas barreiras serão denominadas por geomembranas por ser o termo comumente utilizado pela comunidade técnico-científica.

Os diferentes geossintéticos quando combinados entre si formam os geocompósitos (Figura 2.7).

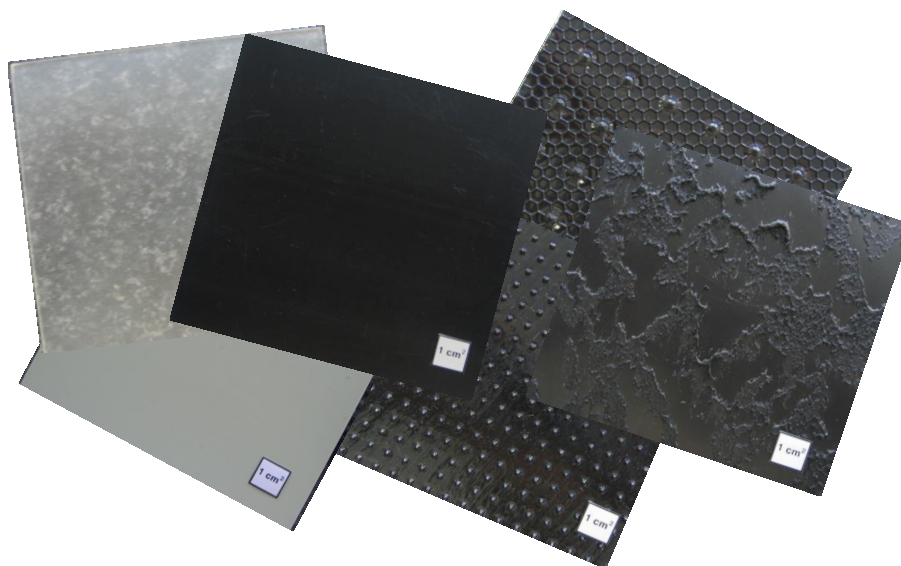


Figura 2.6 – Geomembranas.

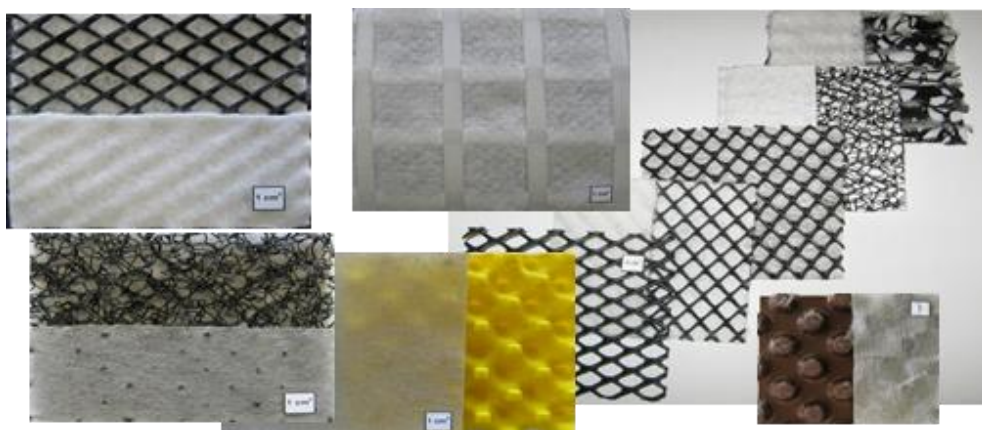


Figura 2.7 – Geocompósitos.

2.3 Funções dos geossintéticos

Os geossintéticos podem desempenhar várias funções em obras de engenharia civil, nomeadamente as seguintes: reforço, separação, filtragem, drenagem, barreira, e controlo de erosão. Nas Figuras 2.8 a 2.13 apresentam-se alguns esquemas ilustrativos destas funções.

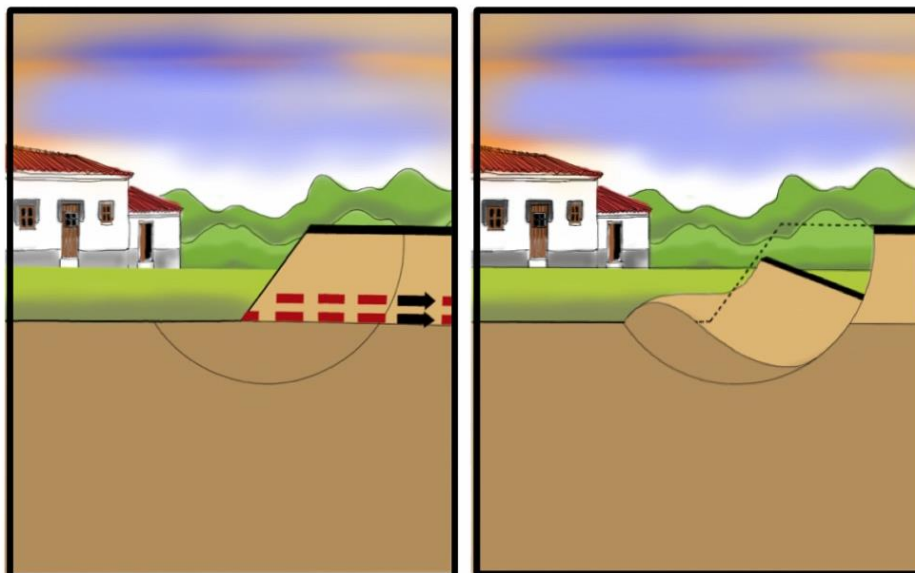


Figura 2.8 – Função de reforço.

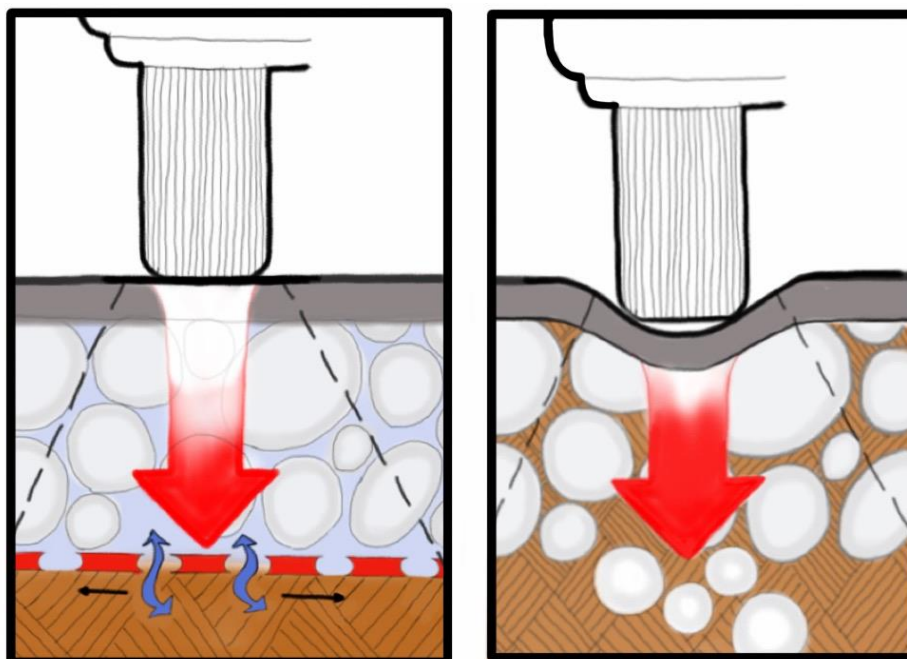


Figura 2.9 – Função de separação.

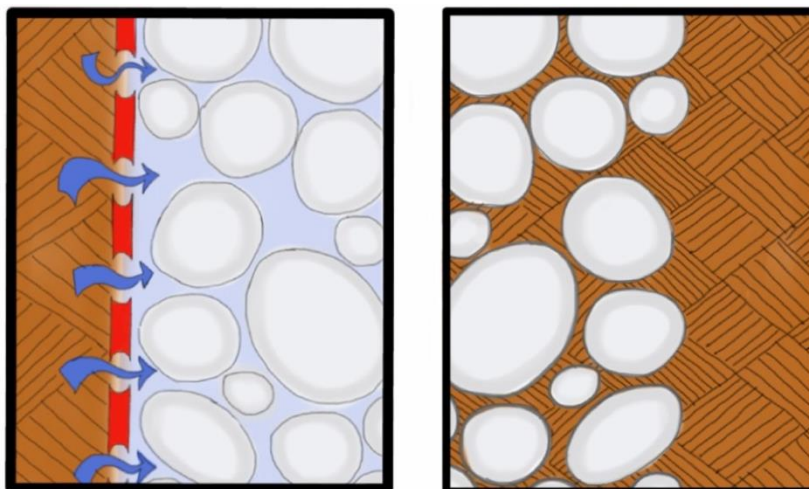


Figura 2.10 – Função de filtragem.

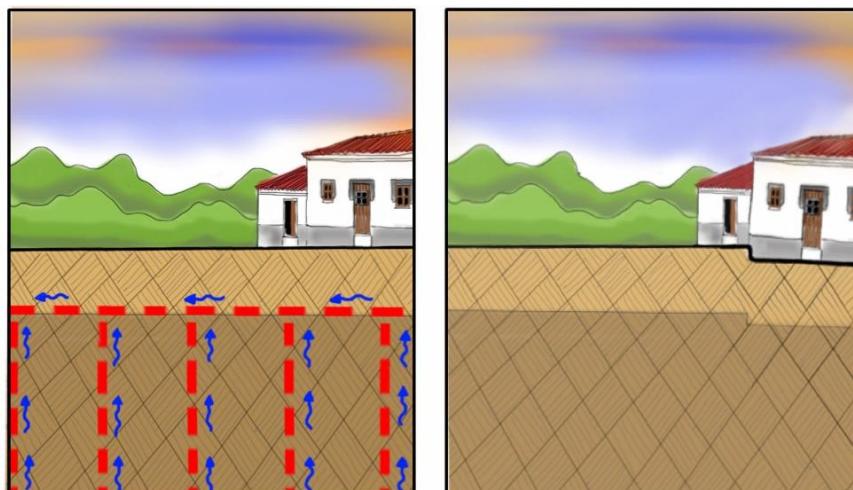


Figura 2.11 – Função de drenagem.

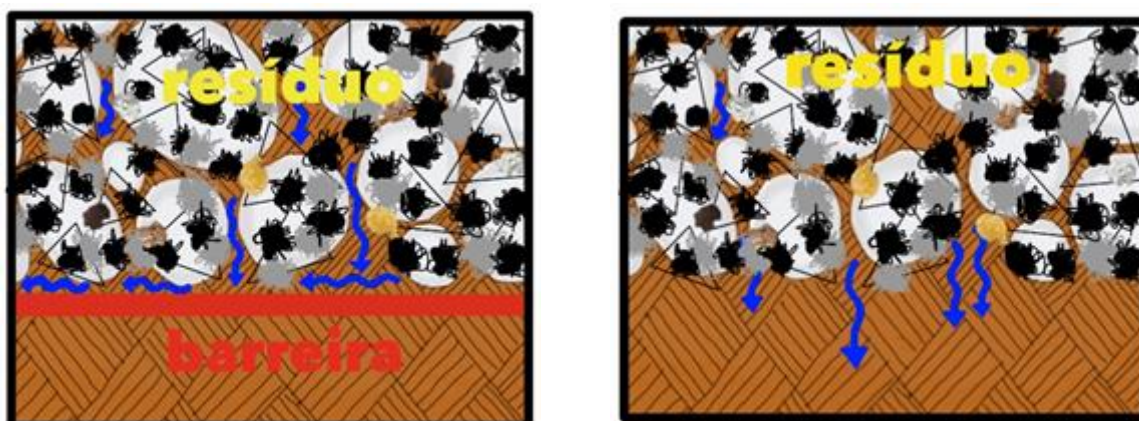


Figura 2.12 – Função de barreira.

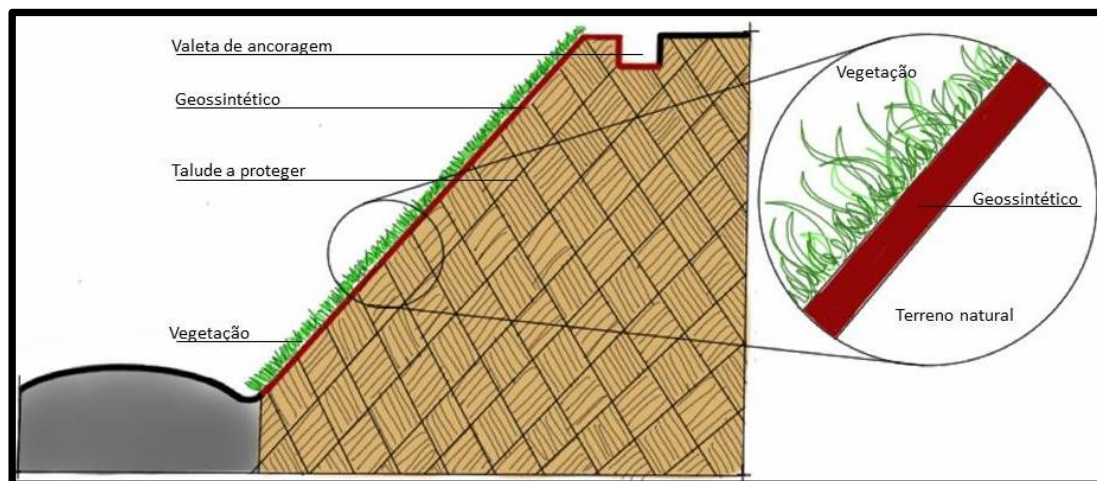


Figura 2.13 – Função de controlo de erosão (adaptado de Lopes e Lopes, 2010)

Apresenta-se no Quadro 2.1 um resumo das principais funções que os geossintéticos podem desempenhar em diferentes aplicações, dando particular destaque às aplicações em vias de comunicações.

Quadro 2.1 – Aplicações de geossintéticos em vias de comunicação (adaptado de Lopes e Lopes, 2010).

Domínios de aplicação	Funções	Tipos de aplicação
Aterros	Drenagem, filtragem, controlo de erosão, separação, reforço.	Dreno horizontal entre o aterro e os solos saturados da fundação. Separação dos solos moles e dos materiais de aterro. Reforço na base.
Estabilização e proteção de taludes	Filtragem, controlo de erosão, reforço.	Filtro entre os solos do aterro e dispositivos de proteção dos taludes. Geossintéticos colocados sobre os taludes, prevenindo a erosão. Sacos com solo ou betão, protegendo os taludes. Reforço de taludes instáveis. Taludes reforçados e protegidos.
Muros. Estruturas de suporte de terras	Reforço.	Muros de terra reforçados.
Pavimentos sobre solos moles	Reforço, ação mecânica de membrana, separação, filtragem, drenagem. Separação dos materiais do pavimento e dos solos moles da base,	Reforço dos solos moles na base (“ponte” sobre materiais moles). Filtragem e drenagem dos solos saturados da base.
Reabilitação de pavimentos	Proteção, barreira de fluídos	Geossintéticos colocados entre camadas dos pavimentos, inibindo a propagação de fendas.
Vias-férreas (novas e reabilitadas)	Separação, reforço, drenagem, filtragem	Separação do balastro e do material de aterro; reforço do sistema de distribuição das cargas.
Túneis	Proteção, drenagem, barreira de fluídos	Proteção das geomembranas (barreira de fluídos); drenagem das águas.

2.4 Aplicações dos geossintéticos em vias de comunicação

Em vias de comunicação, os geossintéticos podem ser usados em obras de caminho-de-ferro, em estradas não pavimentadas, em estradas pavimentadas e, como já foi dito anteriormente, em várias obras de natureza geotécnica, tais como aterros reforçados, taludes muito inclinados, e estruturas de controlo de erosão.

Em obras de caminho-de-ferro, os geossintéticos podem ser utilizados tanto na construção como na reabilitação, podendo desempenhar várias funções. Podem, por exemplo, ser colocados entre as camadas de balastro e de sub-balastro, para reforço, com vista a proporcionar o aumento da vida útil da infraestrutura e diminuir a necessidade de manutenção. Por outro lado, se forem colocados na interface entre a fundação e a camada de sub-balastro permitem aumentar a capacidade de suporte da fundação, o que é de grande utilidade quando esta possui baixa capacidade de carga (Jenner, 2005). Para estas aplicações são, geralmente, utilizadas as geogrelhas. Podem, também, ser utilizados na função de separação, para evitar que os materiais finos da fundação contaminem a camada de balastro ou sub-balastro, constituída por materiais granulares (Figura 2.14), sendo tipicamente utilizados os geotêxteis neste caso.

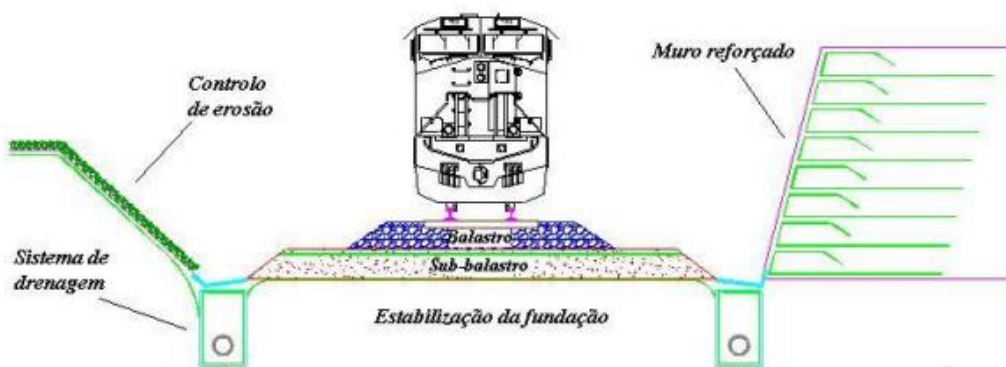


Figura 2.14 – Aplicação de geossintéticos em obras de caminho-de-ferro (IGS – Portugal, 2014).

Nas estradas não pavimentadas os geossintéticos são utilizados como reforço dos solos e em plataformas de solos moles, com as funções de separação, de reforço e de drenagem. Nestes casos os materiais mais utilizados são os geotêxteis e as geogrelhas. O uso destes materiais apresenta como vantagens uma redução da altura do aterro, redução da deformação lateral do aterro, distribuição de tensões mais uniforme, redução da deformação vertical devida ao efeito de membrana, aumento da vida útil da estrada, necessidade de menos manutenção e redução dos custos de construção e de operacionalidade (IGS – Portugal, 2014). A título de exemplo, mostra-se na Figura 2.15, que se a estrada for reforçada com geossintéticos é possível diminuir a altura do aterro de fundação, comparativamente com uma estrada não reforçada, o que constitui uma melhoria.

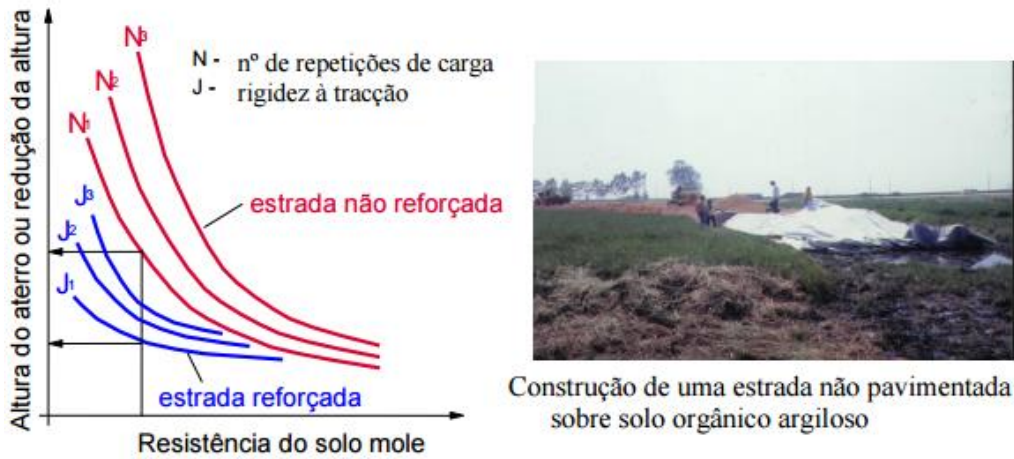


Figura 2.15 – Geossintéticos em estradas não pavimentadas (IGS – Portugal, 2014).

Em estradas pavimentadas, os geossintéticos podem ser usados com a função de separação, para evitar que os materiais finos da fundação penetrem na camada de base sobrejacente, preservando as características da camada de base e a sua espessura. Podem, igualmente, ser usados para reduzir a reflexão de fendas. À semelhança da situação das vias férreas, quando aplicados sobre a fundação, permitem reduzir a espessura do leito do pavimento e assim aumentar a sua vida útil: Por outro lado, quando aplicados na interface entre as camadas granulares e a camada de desgaste, permitem reduzir a espessura desta última camada. A utilização destes materiais pode ainda proporcionar um aumento na durabilidade da estrada na medida em que permite reduzir a profundidade dos sulcos causados sobretudo pelo tráfego de veículos pesados (Figura 2.16).

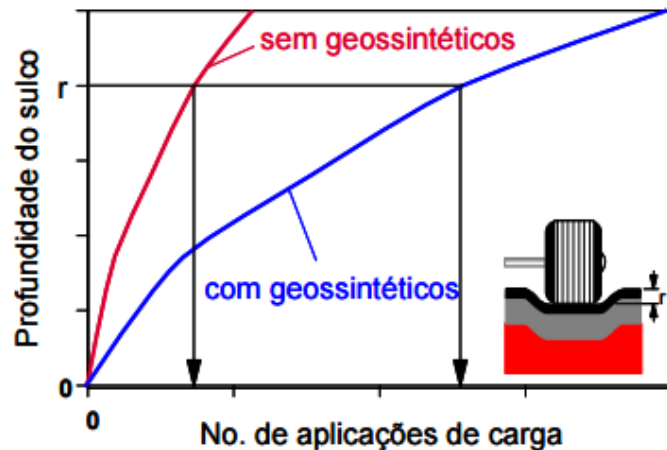


Figura 2.16 – Geossintéticos em estradas pavimentadas (IGS – Portugal, 2014).

Nas aplicações referidas, podem, igualmente, ser usados como drenos e filtros, em substituição dos materiais granulares, ou utilizados em conjunto com os mesmos para melhorar a capacidade de filtragem.

Outras aplicações dos geossintéticos no domínio das vias de comunicação consistem na estabilização de taludes. Por exemplo, podem ser utilizados geotêxteis e geogrelhas para conferir alguma resistência à tração do solo com o objetivo de possibilitar a construção de taludes mais íngremes.

A título de exemplo, refira-se a aplicação de geossintéticos na Autoestrada A32, que liga o concelho de Oliveira de Azeméis a Vila Nova de Gaia, para a estabilização de um talude com uma grande inclinação, como se mostra na Figura 2.17.



Figura 2.17 – Aterro reforçado com geossintéticos na autoestrada A32.

Também de destacar a utilização de uma nova técnica na autoestrada A21, Malveira, a denominada a “banqueta viva”, que consiste na colocação de uma geomembrana subjacente à camada de terra de suporte à vegetação e cujo objetivo é reduzir a infiltração da água (Figura 2.17), prescindindo do betão ou de outros materiais inertes para a impermeabilização, com a vantagem de reduzir a carga e o custo de execução da obra (Estradas.pt, 2015).



Figura 2.18 – Aplicação de geomembrana em “banquetas vivas” na Autoestrada A21 – Malveira (antes e após reabilitação do talude)

Por fim, de salientar a utilização de geossintéticos no controle de erosão, nomeadamente, na proteção de taludes escavados em rochas brandas. A título de exemplo, de referir a recente utilização

de uma geomembrana de polietileno de alta densidade (Figura 2.19), na autoestrada A10 (Arruda dos Vinhos/Carregado, Formação da Abadia), com vista à proteção do talude contra os efeitos de ações climáticas e, conseqüentemente, evitar potenciais deslizamentos (Cardoso, 2014).



Figura 2.19 – Aplicação de geomembrana na Autoestrada A10 em taludes de escavação em margas para evitar a degradação dos materiais expostos às condições atmosféricas (Cardoso, 2014).

Esta aplicação recente de geomembranas expostas às condições climáticas levanta questões sobre o seu desempenho a longo prazo, razão pela qual, neste trabalho, se procura contribuir para o conhecimento da evolução das suas propriedades face à exposição em diferentes locais do país.

2.5 Geomembranas

2.5.1 Polímeros

2.5.1.1 Conceito

Para melhor se compreenderem as propriedades das geomembranas e os aspetos que influenciam o seu desempenho é importante caracterizar os polímeros que as constituem. De referir, contudo, que para esta caracterização são necessários alguns conceitos no domínio da química. Tratando-se de um tema marginal ao presente trabalho, serão apenas apresentados os conceitos que se consideraram indispensáveis para compreender o comportamento das geomembranas.

Um polímero é um material cujas moléculas são constituídas por um número elevado de átomos, que se repetem de algumas dezenas a alguns milhares e dadas as suas dimensões, são normalmente designadas por macromoléculas ou cadeias (Dantas & Ramalho, 2011). Ainda segundo os mesmos autores, os polímeros podem ser naturais: borracha, algodão e lã; semissintéticos: celuloide e borracha vulcanizada; ou sintéticos tais como, o polietileno (PE) e o policloreto de vinilo (PVC).

Com a evolução científica e tecnológica actual existem muitos tipos de polímeros, sendo os mais usados no fabrico de geomembranas os listados no Quadro 2.2.

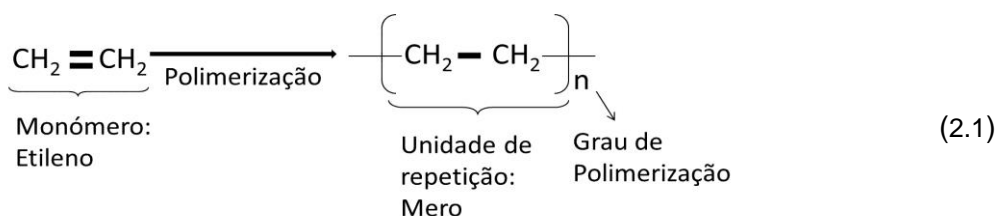
Quadro 2.2 – Abreviaturas e designação de polímeros.

Abreviatura	Polímero
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEMD	Polietileno de média densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
PVC	Cloreto de Polivinilo
PET	Poliéster
PA	Poliamida
PP	Polipropileno
CSPE	Polietileno clorosulfonado
EDPM	Copolímero de etileno-propileno-monómero

Os polímeros são obtidos a partir de reações de polimerização entre espécies de baixa massa molecular designadas por monómeros. A palavra polímero deriva do grego, sendo formada por "poli", que significa muitos, com a palavra "mero", que significa partes (unidades repetitivas). Assim o nome polímero é formado a partir da junção da palavra "poli" com o nome do respetivo monómero.

O grau de polimerização corresponde ao número de vezes que a unidade repetitiva aparece na cadeia, quanto maior o grau de polimerização, maior será o comprimento da macromolécula e maior será a sua massa molecular. O processo de polimerização ocorre quando se juntam os monómeros dando origem a polímeros de grandes dimensões. A massa molecular de um polímero correspondente sempre um valor médio, uma vez que não se consegue que as moléculas do polímero tenham todas exatamente o mesmo tamanho.

A equação 2.1 mostra a formação de uma cadeia polimérica de PE a partir do seu monómero (Lodi, 2003):



- **n** – grau de polimerização
- **C** – átomo de carbono
- **H** – átomo de hidrogénio

2.5.1.2 Classificação

Os polímeros podem ser classificados quanto à sua origem, quanto à deformabilidade e quanto ao seu comportamento quando sujeitos ao efeito do aumento da temperatura.

Quanto à **origem**, classificam-se como polímeros naturais, semissintéticos e sintéticos. Os polímeros sintéticos, por sua vez, podem ser classificados de várias formas, nomeadamente, com base na estrutura química dos polímeros, de acordo com a natureza dos átomos que formam as suas cadeias principais, quanto ao método de preparação (polimerização em cadeia, em etapas, por modificações químicas dos polímeros naturais e por modificações químicas dos polímeros sintéticos), com base no comportamento mecânico do polímero (elastómeros) e segundo as características tecnológicas do polímero (termoplásticos, termoendurecidos), tal como referido por Lodi (2003) (Figura 2.20).

Quanto à **deformabilidade**, classificam-se como elastómeros (quando deformados voltam à sua forma inicial, p. ex. borracha), termoplásticos (quando deformados mantêm a forma assumindo uma deformação permanente, p. ex. o polietileno), e termoendurecidos (bastante resistentes).

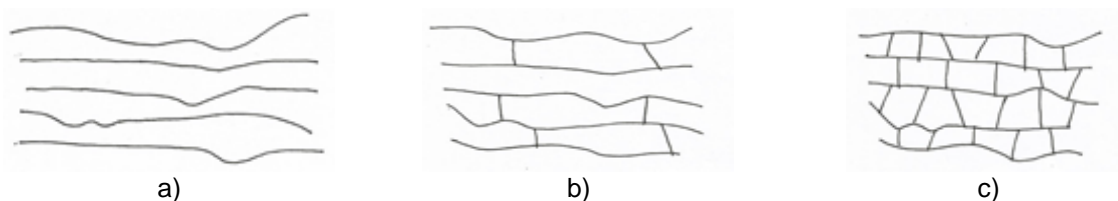


Figura 2.20 – Representação da microestrutura dos polímeros: a) termoplásticos b) elastómeros c) termoendurecidos, (adaptado de Dantas e Ramalho (2011)).

O polietileno é um polímero termoplástico. Os materiais termoplásticos são constituídos por longas cadeias lineares, que quando são aquecidos fundem possibilitando assim a sua moldagem. A moldagem, nestes materiais é um processo reversível: depois de arrefecidos voltam à forma inicial. Não apresentam um ponto de fusão específico, devido às diferenças na massa molecular, ao grau de cristalinidade (ou conteúdo amorfo) e à ramificação das suas cadeias moleculares. O ponto de fusão dos materiais termoplásticos situa-se entre os 120 e os 140°C (Malpass, 2010).

2.5.1.3 Cristalinidade

Em termos de microestrutura, os polímeros são amorfos ou cristalinos conforme a sua estrutura molecular e as interações intermoleculares que se podem estabelecer. Se as macromoléculas se distribuírem aleatoriamente, sem qualquer tipo de organização, diz-se que a estrutura desse polímero é amorfa. Se as moléculas apresentarem organização nomeadamente tridimensional, segundo uma “malha” bem definida que se repete, então o material apresenta uma estrutura cristalina. Materiais como o PE incluem zonas cristalinas e zonas amorfas, sendo designados por semi-cristalinos.

A proporção entre as zonas cristalinas (cristalitos) e as zonas amorfas confere ao polímero o seu grau de cristalinidade. Quanto maior for a quantidade de zonas cristalinas relativamente às zonas amorfas, tanto maior é o grau de cristalinidade do polímero. A proporção de cristalitos afeta as propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade dos polímeros (Greenwood *et al.*, 2012).

A Figura 2.21 é uma representação esquemática da estrutura de um polímero, onde se identificam as zonas amorfa e cristalina.

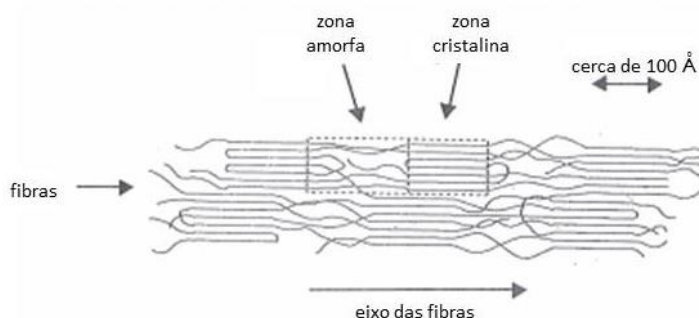


Figura 2.21 – Representação das estruturas cristalina e amorfa dos polímeros (adaptado de Greenwood *et al.*, 2012).

Segundo Lima (2007) quanto maior o grau de cristalinidade de um polímero, maior a sua rigidez; a sua resistência química; a sua densidade; a sua estabilidade dimensional; a sua temperatura de fusão. Por outro lado, o grau de cristalinidade diminui outras das suas propriedades, tais como: a resistência ao impacto; a resistência ao alongamento, e a resistência à microfissuração sob tensão. No caso particular do polietileno de alta densidade, a percentagem de cristalinidade pode atingir os 90%.

2.5.1.4 Aditivos

No sector da industria polimérica um aditivo é uma substância, que é acrescentada em muito pequena quantidade, a um polímero e que é capaz de melhorar as suas propriedades para uma finalidade específica (por exemplo: negro de carbono). Podem ser utilizados vários em simultâneo dependendo das propriedades que se pretendem melhorar.

Segundo Rowe & Ewais (2014) desde os anos 90, as GMs de PEAD são constituídas, em termos gerais, por polietileno (96 a 97,5%); negro de carbono (2 a 3%) e cerca de 0,5% de antioxidantes.

O negro de carbono é o aditivo que é adicionado à formulação das geomembranas com o principal objetivo de lhe conferir estabilização à ação da radiação UV. A quantidade de negro de carbono adicionada à formulação das geomembranas aumenta a sua durabilidade (Accorsi & Romero, 2005).

Os antioxidantes são adicionados à formulação das geomembranas para prevenir a sua oxidação e para garantir uma maior vida útil das mesmas. Existem muitos tipos de antioxidantes que têm

comportamentos distintos. Normalmente são adicionados mais que um tipo de antioxidantes que atuam sinergicamente melhorando a sua vida útil (Hsuan & Koerner, 1998).

De referir que, segundo Rowe *et al.* (2003), as geomembranas de PEAD atuais são fabricadas com polietileno de média densidade, no entanto a adição de negro de carbono aumenta a sua densidade para valores superiores a 0,941 g/cm³, classificados pela norma ASTM D 883 como polietilenos de alta densidade.

2.5.2 Propriedades das geomembranas

2.5.2.1 Caracterização geral

Segundo Lopes & Lopes (2010), “a seleção de um produto para uma determinada aplicação em engenharia civil é feita mediante a quantificação das propriedades relevantes para as funções que o material irá desempenhar durante a vida útil da obra”.

Para avaliação das propriedades das geomembranas, existem normas desenvolvidas por diferentes organismos internacionais de normalização, entre os quais a *International Organization for Standardization* (ISO), o *European Committee of Standardization* (CEN) e a *American Society for Testing Materials* (ASTM).

No Quadro 2.3 apresentam-se as principais propriedades das geomembranas, classificadas como físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas.

Quadro 2.3 – Ensaio em geomembranas (adaptado de Lodi, 2003)

PROPRIEDADES	NORMAS
Físicas	
Massa por unidade de área	EN 1849-2, ASTM D3776
Massa volúmica/Densidade*	ASTM D1505 e ISO 1183
Espessura nominal	EN 1849-2, ASTM D5199, D3767
Dureza	ASTM D2240
Químicas	
Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	ASTM D3417, D3418 E ISO 11357
Análise Termogravimétrica (TGA)	ASTM D6370, E2105
Análise Termomecânica (TMA)	ASTM D648, E831
Teor em cinzas	ASTM D297
Tempo de indução à oxidação (OIT)	ASTM D3895
Teor em negro de carbono (PE)	ASTM D1603, ISO 6964
Dispersão em negro de carbono (PE)	ASTM D5596, D3015
Índice de fluidez	NP EN ISO 1133
Mecânicas	
Estabilidade dimensional	ASTM D1204
Resistência à tração e extensão na cedência e na rotura	ISO R 527, ASTM 6693
Resistência ao punção estático	NP EN ISO 12236
Resistência ao rasgamento	ISO 34, ASTM D1004, D624
Hidráulicas	
Permeabilidade à água	EN 14150

*A densidade relativa é definida como a razão entre a massa volúmica dos elementos que constituem o geossintético e a massa volúmica da água a 4°C.

No âmbito do presente trabalho, destacam-se seguidamente as propriedades consideradas relevantes, para avaliar a influência das condições climáticas sobre as geomembranas,

nomeadamente, as seguintes: 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.

2.5.2.2 Massa volúmica

A massa volúmica de uma substância define-se por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

sendo que:

- m – massa da substância expressa em g;
- V – volume da substância expresso em cm^3 ;
- ρ - massa volúmica da substância expressa em g/cm^3 .

A massa volúmica é uma propriedade física dos materiais que pode ser alterada quando os materiais poliméricos ou outros são sujeitos a condições adversas, tais como exposição às condições climáticas em períodos prolongados.

Lodi (2003) refere que a cristalinidade do polímero está diretamente relacionada com a sua densidade. No Quadro 2.4 resumem-se as variações esperadas nas diferentes propriedades com o aumento da densidade do PE. A determinação da massa volúmica é importante por estar diretamente relacionada com a cristalinidade (Halse *et al.*, 1991), que determina 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 ou “*stress cracking*” SCR).

Quadro 2.4 – Variação das diferentes propriedades do PE com o aumento da densidade (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 (SCR)	Diminuição
Permeabilidade	Diminuição
Resistência Química	Aumento

2.5.2.3 Índice de fluidez

O índice de fluidez (MFI) é um parâmetro definido empiricamente, inversamente proporcional à viscosidade do material no estado fundido, a uma dada temperatura e a uma dada tensão de corte especificada pelas condições operacionais da medição (Rocha *et al.*, 1994). O MFI é considerado uma característica fundamental de um polímero. A determinação do MFI no controlo de fabrico de um polímero tem por objetivo o controlo da sua uniformidade através da extrusão do mesmo sob uma determinada pressão e temperatura.

No processo de fabrico de polímeros, a qualidade do material pode ser monitorizada pela temperatura da reação, pela pressão a que ocorre a reação, etc. Estes parâmetros apresentam uma relação com o MFI do polímero resultante e, portanto, podem ser facilmente ajustados de forma a obter-se um polímero com determinadas características através da medição do MFI.

Um valor alto do índice de fluidez indica que o polímero ensaiado apresenta um peso molecular baixo, esta propriedade condiciona diretamente as propriedades mecânicas destes materiais. Contudo, a comparação de valores de índice de fluidez só têm significado se forem comparadas geomembranas de um mesmo polímero (Rowe & Ewais, 2014).

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*) quer reações de cisão da cadeia polimérica (*chain reaction*), produzindo assim alterações no seu peso molecular. Das ligações devidas a *crosslinking* resulta um aumento no peso molecular, das reações de cisão da cadeia polimérica resulta a diminuição do peso molecular (Lodi, 2003).

2.5.2.4 Resistência à tração e extensão

Segundo Lopes & Lopes (2010) a resposta dos geossintéticos sujeitos a tração é, geralmente, caracterizada pela curva que relaciona a força por unidade de largura do provete (em kN/m) com as extensões (adimensionais, normalmente expressas em percentagem). Para obter as tensões seria necessário dividir a força por unidade de largura pela espessura da geomembrana mas, como a espessura varia com a carga aplicada durante o processo de extensão, não é vulgarmente utilizado.

A partir da curva referida é possível obter: a resistência à tração (força máxima por unidade de largura na rotura); a extensão na rotura; e o módulo de rigidez (definido como a razão entre a força por unidade de largura e a extensão correspondente enquanto o material apresenta comportamento elástico).

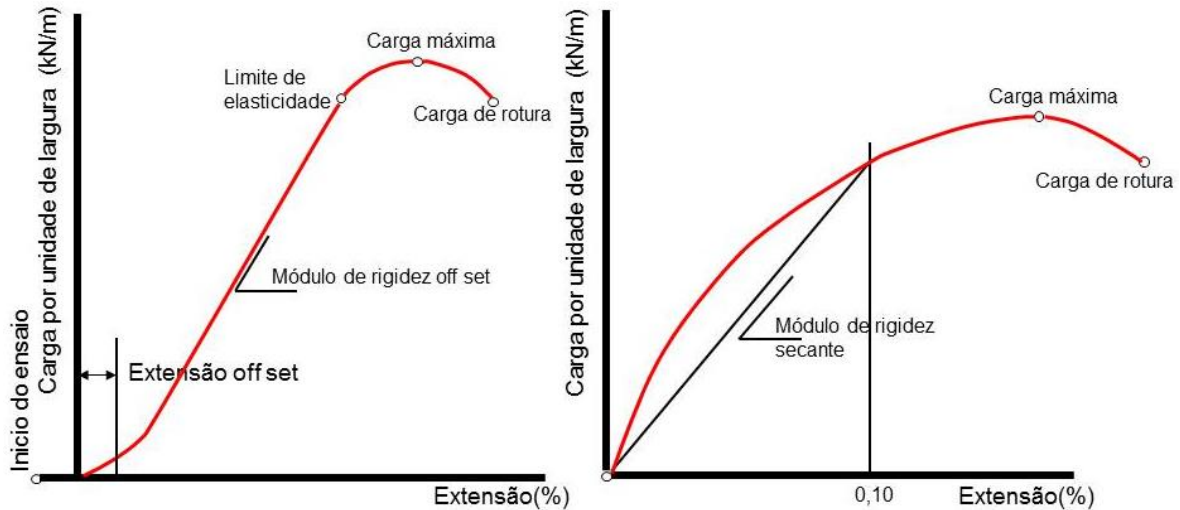


Figura 2.22 – Curvas típicas força-extensão de geossintéticos (adaptado de Lopes & Lopes, 2010).

As geomembranas de PEAD apresentam um pico de tensão bem definido (ponto de cedência) para pequenas extensões (cerca de 15%). Com o aumento da sollicitação 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 sollicitação, 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 2.23.

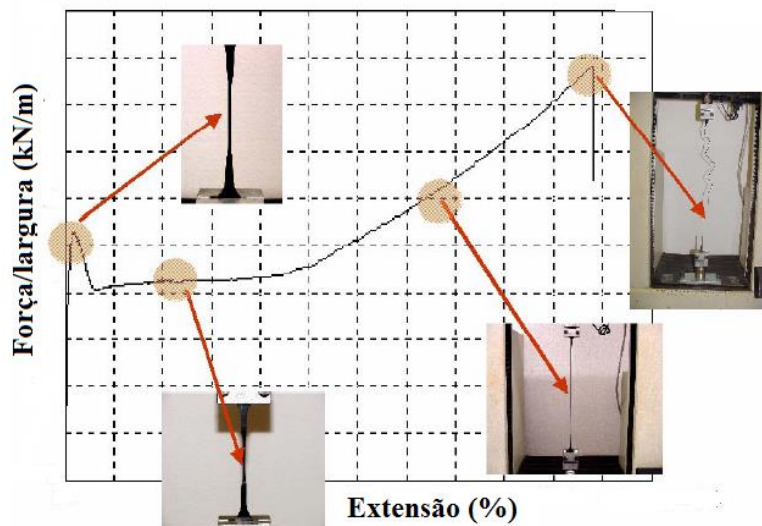


Figura 2.23 – Comportamento Força/Extensão de Geomembranas de PEAD (Lodi, 2003).

As propriedades mecânicas das geomembranas (resistência à tração e extensão) são úteis para avaliar a degradação das geomembranas em resultado da oxidação (foto-oxidação e

termo-oxidação). Com a oxidação a cristalinidade das geomembranas aumenta, tornando-as mais frágeis. Em consequência, a resistência à tração na rotura diminui (Rowe *et al.*, 2009).

2.5.2.5 Teor em negro de carbono

O negro de carbono absorve e/ou dispersa a radiação UV, deste modo, protege os polímeros contra os efeitos da radiação UV. O negro de carbono é formado pela decomposição térmica (pirólise) ou combustão de hidrocarbonetos. É um dos pigmentos mais utilizados na indústria dos polímeros, por vários motivos. Tem elevado poder de pigmentação, baixo custo, alta eficiência, e excelente desempenho (quer como colorante, quer como estabilizante UV) (Suits & Hsuan, 2003).

A quantidade de negro de carbono existente numa amostra pode ser determinada por análise gravimétrica, após pirólise das amostras em azoto.

Uma diminuição dos teores de negro de carbono pode ser relacionada com a degradação dos materiais poliméricos, no caso em estudo pode ser um indicador de degradação de uma geomembrana de PEAD. O conhecimento do teor em negro de carbono nas diferentes fases da vida de um dado material permite avaliar o seu estado de conservação.

2.5.2.6 Tempo de indução à oxidação (OIT)

A durabilidade das geomembranas de PEAD é diminuída também pela oxidação que se consiste na reacção entre o plímero e o oxigénio molecular, o oxigénio atravessa as regiões amorfas do polímero e dá-se a oxidação tanto no interior como na superfície do polímero (Greenwood *et al.*, 2012). A avaliação da estabilidade de oxidação do polietileno pode ser obtida pela medida do tempo de indução à oxidação (OIT). 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 os antioxidantes também protegem a geomembrana da degradação (Hsuan *et al.*, 1998).

De acordo com Lodi (2003) o valor de OIT é proporcional à concentração de antioxidante presente no material. Não devem ser comparados valores de OIT para materiais diferentes.

Existem dois tipos de ensaios para determinação do tempo de indução à oxidação: o ensaio convencional (Std-OIT) que se realiza a uma pressão de 35 kPa e o ensaio com pressão de 3500 kPa (HP-OIT).

Em ambos os ensaios, o valor do tempo de indução à oxidação das amostras é obtido graficamente, verificando-se o tempo decorrido desde o início da oxidação até à oxidação completa. A fase final do ensaio é representada pelo aparecimento de um pico de oxidação. Na Figura 2.24 pode verificar-se a forma como se calcula o tempo de indução à oxidação (Lodi, 2003).

Na Figura 2.24 são representadas esquematicamente todas as fases do processo de ensaio, a Figura 2.25 mostra um exemplo de um registo da determinação do tempo de indução à oxidação pelo método das tangentes. O valor de OIT é dado em minutos e corresponde à diferença entre o tempo no fim e o tempo no início da oxidação que no exemplo corresponde a 10,05 minutos.

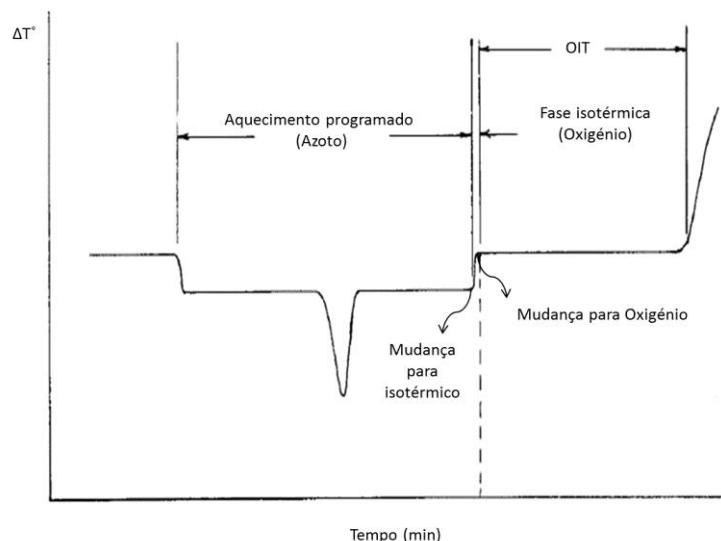


Figura 2.24 – Esquema do registo gráfico desde a adição de O₂ até à oxidação total (ensaio OIT).

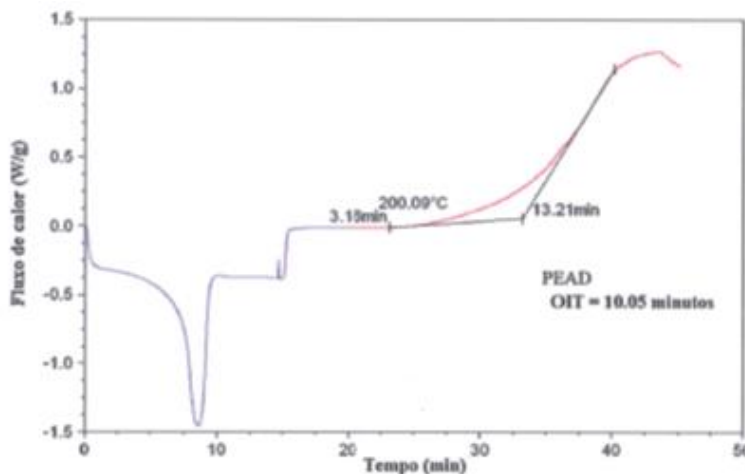


Figura 2.25 – Registo da determinação do tempo de oxidação indutiva pelo método das tangentes (adaptado de Lodi, 2003).

2.5.3 Degradação

A aplicação de GMs em obras de engenharia abrange diferentes áreas, como já foi referido anteriormente. A sua aplicação apresenta vantagens comparativamente com os materiais tradicionais nomeadamente a nível económico, no entanto, estas também sofrem processos de degradação quando em contacto com os agentes externos sob as condições climáticas.

Segundo Lodi (2003) a degradação de uma GM não deve ser confundida com a sua durabilidade. A degradação é o processo em que se alteram as suas propriedades de forma lenta e irreversível sob as condições do meio onde esta está instalada. A durabilidade é a capacidade que a GM tem de preservar as suas propriedades, resistindo ao envelhecimento apesar de as suas propriedades permanecerem dentro dos limites definidos na presença dos agentes ambientais e outros ao longo da sua vida útil.

As geomembranas quando aplicadas em situações de exposição às condições climáticas estão sujeitas a uma série de fatores externos que contribuem para a sua degradação. Estes fatores influenciam as suas propriedades de uma forma sinérgica, isto é, isoladamente e em conjunto, contribuem para a degradação destes materiais. Segundo Lopes & Lopes (2010), os diferentes agentes que afetam a durabilidade das GMs interatuam com o polímero e com os aditivos, pelo que os efeitos, do conjunto dos agentes de degradação pode ser muito significativo. O efeito conjunto dos vários agentes de degradação normalmente é mais gravoso para os materiais do que o efeito de cada um deles atuando isoladamente.

Segundo Rowe & Ewais (2014) a degradação pode ser devida a dois fatores: (i) degradação química do polietileno que envolve a degradação devida à radiação UV (foto-oxidação) (ii) ou à oxidação térmica (termo oxidação), que são considerados como sendo os mais prejudiciais para o polietileno de alta densidade exposto às condições climáticas, e também pode ser devida a uma mudança na estrutura morfológica da GM, que pode resultar no aumento da cristalinidade (neste caso a GM torna-se mais vítrea e menos flexível, diminuindo assim a sua resistência aos esforços).

De acordo com Hsuan & Koerner (1998) a degradação química envolve três fases distintas: (A) depleção de antioxidantes, (B) tempo de indução para o início da degradação química do polímero e (C) degradação química significativa do polímero, que se inicia no final da fase B até à falência da GM (Figura 2.26).

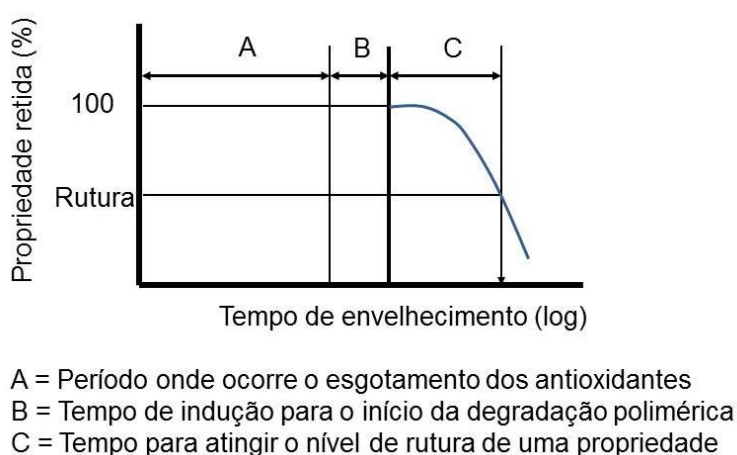


Figura 2.26 – Fases de degradação química devido a oxidação de geomembranas de polietileno de alta densidade.

Na fase (A) ocorre o consumo de antioxidantes. O consumo de antioxidantes é consequência de dois processos (i) ocorrem reações químicas com o oxigénio e este difunde-se na geomembrana, e (ii)

ocorre a perda física de antioxidantes. Este processo envolve duas funções principais, a ligação com os radicais livres e com os peróxidos (ROOH) convertendo-os em moléculas mais estáveis. Tendo em conta a perda física este processo envolve a distribuição dos antioxidantes na geomembrana e a sua volatilidade e a capacidade de serem extraídos da geomembrana para o ambiente. Este consumo pode ser monitorizado através da realização de ensaios de determinação do tempo de indução à oxidação (OIT). Como apenas ocorre consumo de antioxidantes as propriedades mecânicas não se alteram, dá-se apenas uma alteração da massa molecular. O final desta fase ocorre quando os valores de OIT atingem um valor mínimo, na ordem dos 0,5 minutos, indicando assim que todos os antioxidantes que na altura do fabrico, foram adicionados à geomembrana, foram consumidos (Greenwood *et al.*, 2012).

Na fase (B) (tempo de indução), nesta fase ainda não ocorreu nenhuma alteração nas propriedades mecânicas, apesar da falta de proteção de antioxidantes. Ocorrem alterações da massa molecular mas não foi ainda atingido o nível necessário para ocorrer uma redução da resistência devido a ligações cruzadas que se estabelecem no PE. Esta fase pode ser longa desde que as condições existentes sejam favoráveis. O fim desta fase é definido pelo ponto em que a força mecânica começa a diminuir, indicando que foi alcançada a massa molecular crítica (Greenwood *et al.*, 2012).

Na fase (C) a resistência mecânica diminui e ocorre uma redução significativa na massa molecular. A oxidação é desinibida e ocorre um rápido consume de oxigénio, as ligações entra as moléculas são destruídos e as propriedades mecânicas sofrem alterações. Esta fase termina quando a força necessária para causar alterações mecânicas atinge um valor que seja metade do valor determinado inicialmente (Greenwood *et al.*, 2012).

Na Figura 2.27 são representadas as fases de degradação química devido à oxidação de geomembranas de PEAD.

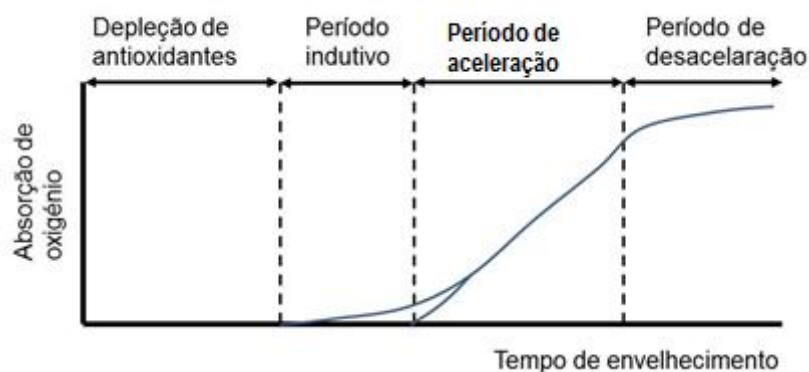


Figura 2.27 – Fases de oxidação do polietileno.

O tempo de vida de uma geomembrana é considerado o somatório das três fases e pode ser um período tão pequeno como um ano ou uma centena de anos, dependendo das características da GM e das condições iniciais de exposição da mesma (Rowe & Ewais, 2014).

Influência da radiação ultravioleta

Segundo Koerner (2012), a degradação da geomembrana é devida a vários mecanismos de degradação, entre os quais ultravioleta, radioativa, biológica, química, térmica, e oxidação. No entanto, a radiação solar é a causa mais importante de degradação. Porém a radiação UV e a temperatura em conjunto, são considerados os agentes de degradação mais agressivos para as geomembranas expostas às condições climáticas, sendo difícil separar os efeitos.

A radiação ultravioleta (UV) faz parte do espectro da radiação eletromagnética cujos comprimentos de onda estão compreendidos entre 290 nm a 400 nm. De acordo com Greenwood *et al.* (2012) o comprimento de onda mais agressivo para o polietileno é o que se situa entre os 330 e os 360 nm e é responsável pelo início da foto-oxidação. Esta inicia-se gerando radicais livres que podem iniciar uma reação de oxidação que conduz à rutura da cadeia do polímero e, conseqüentemente, à sua degradação.

Rowe & Ewais (2012) propuseram uma relação entre o índice IUV, taxas de degradação e a temperatura das GMs.

O conceito de Índice UV (IUV) foi desenvolvido com vista a informar as populações sobre a intensidade máxima diária da radiação ultravioleta num dado local e que pode ser nociva para a saúde humana, 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 numericamente 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 IUV 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 IUV (Quadro 2.5).

Quadro 2.5 – 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; ...[

No Quadro 2.6 apresenta-se a classificação proposta por Rowe & Ewais (2012) entre a relação do índice IUV e taxas de degradação e a temperatura das GMs.

Os valores médios do IUV para a latitude de Portugal enquadram-se para o período compreendido entre os meses de outubro e abril entre 3 e 6, o que significa Moderado com possibilidade de Alto em alguns momentos deste período e entre 9 e 10 para o período compreendido entre maio e setembro, o que corresponde a Muito Alto (IPMA, 2015).

Quadro 2.6 – Relação entre o índice UV e a temperatura da geomembrana de cor preta exposta (adaptado de Rowe & Ewais, 2014).

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

A área geográfica de interesse para o presente trabalho, é compreendida, em latitude, entre 26°N e 42°N, e em longitude, entre 32°W e 5°E (Portugal e Espanha), e com base nos dados recolhidos por satélite e extraídos do *website* <http://temis.nl/> para todo o período 2003-2012 (10 anos) convertidos no Instituto Português do Mar e da Atmosfera apresenta-se na Figura 2.28 a distribuição do valor médio anual do IUV_{CL} (índice de UV para céu limpo); para a península Ibérica (Nunes *et al.*, 2013).

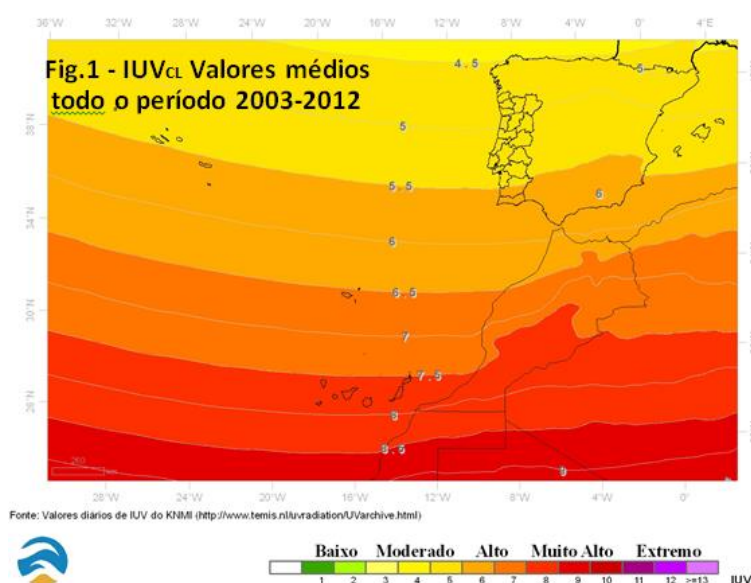


Figura 2.28 – Distribuição do valor médio do índice UV_{CL} para o período de 2003-2012 (Nunes, et al., 2013)

2.6 Revisão bibliográfica

Com o objetivo de compreender o estado atual do conhecimento sobre a influência das condições climáticas sobre as geomembranas, independentemente da sua aplicação, apresenta-se seguidamente uma breve revisão dos principais trabalhos realizados neste domínio.

Rowe *et al.* (2003) realizou um estudo sobre a avaliação da durabilidade de uma geomembrana de polietileno de alta densidade PEAD com 1,5 mm de espessura, após 14 anos de exposição numa lagoa de armazenamento de lixiviados, localizada no Canadá, na região de Ontário, numa zona onde as estações apresentam grandes amplitudes térmicas que podem variar entre 1°C, no inverno, e 25°C no verão. Nesse estudo, a geomembrana esteve exposta em cinco situações diferentes: (1) zona de ancoragem da geomembrana (enterrada), (2) acima do nível do lixiviado (com exposição às condições atmosféricas); (3) interface do lixiviado (com exposição às condições atmosféricas, com lixiviado); (4) abaixo do nível de lixiviado (exposta a com lixiviado); (5) abaixo do nível mínimo de lixiviados (sem exposição à luz solar, com lixiviado e lamas), como se ilustra na Figura 2.29.

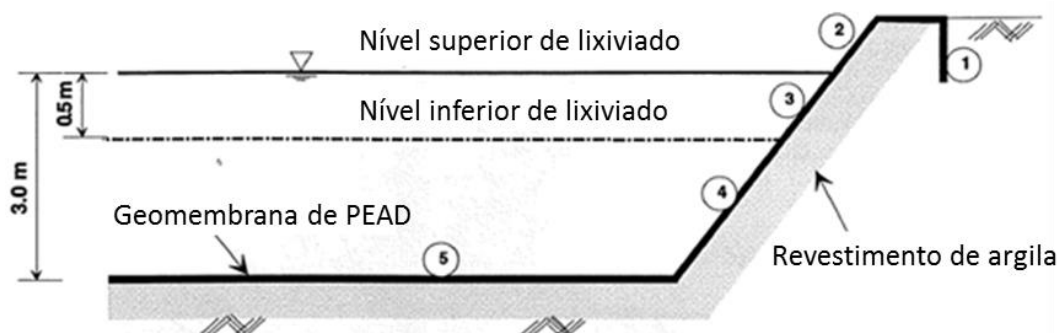


Figura 2.29 – Localização das geomembranas ensaiadas (Rowe *et al.*, 2003).

Foram realizados vários ensaios laboratoriais (Quadro 2.7) sobre as diferentes amostras.

Quadro 2.7 – Normas ASTM (adaptado de Rowe *et al.*, 2003).

Norma de ensaio - ASTM	
ASTM D 3895	Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry" (<i>tempo de indução à oxidação</i>)
ASTM D 1603	Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics" (<i>teor em negro de carbono</i>)
ASTM D792	Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement (densidade, massa volúmica)
ASTM D1238-c ou EN ISO 1133 (190°C/5kg) 4	Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer (<i>índice de fluidez</i>)
ASTM D 638 (substituída pela ASTM 6693)	Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes – (resistência à <i>tração e extensão na cedência e na rotura</i>)

Apresenta-se no Quadro 2.8 os resultados dos ensaios realizados nas zonas de exposição às condições atmosféricas sem lixiviado (zona 2).

Quadro 2.8 – Resumo das características físicas, químicas e mecânicas das amostras (*adaptado de Rowe et al, 2003*).

Amostra	Norma de ensaio							
	D3895 Std OIT (min)	D1603 CBC (%)	D792 ρ_g (g/cm ₃)	D1238 MFR (g/10 min)	D638 Cedência		D638 Rótura	
					σ (KN/m)	ϵ (%)	σ (KN/m)	ϵ (%)
SNL (zona 2)	1,8	2,64	0,967	0,50	37	11	25	379

Nota: os resultados representam os valores médios dos ensaios realizados em várias amostras por Rowe *et al*, 2003)

O tempo de indução à oxidação foi de 1,8 min. Embora os autores não tivessem tido acesso às propriedades originais da geomembrana, o valor obtido foi muito reduzido à luz dos valores atualmente requeridos para esta propriedade, os quais são superiores a 100 minutos. Contudo, como a formulação original da geomembrana era desconhecida, os autores não estimaram a taxa de depleção de antioxidantes. Referiram no entanto que, face aos valores obtidos, deverá ter ocorrido alguma oxidação da geomembrana.

Para a massa volúmica obtiveram um valor superior ao esperado, tendo atribuído esse facto a um aumento da cristalinidade da geomembrana. Efetivamente, de acordo com Halse *et al.* (1991), esta propriedade está diretamente relacionada com a cristalinidade, afetando as propriedades térmicas (ponto de endurecimento, viscosidade e temperatura de fusão), mecânicas (resistência à tração e flexibilidade) e químicas (resistência química e ao “*stress cracking*” SCR).

Quanto ao índice de fluidez (MFR), o valor obtido, de 0,50 g/10 min, indicou que a geomembrana exposta às condições climáticas apresentou a maior degradação, comparativamente às restantes amostras ensaiadas pelos autores. Um valor de MFR elevado corresponde a um peso molecular do polímero baixo, o que condiciona também as propriedades mecânicas destes materiais.

Relativamente ao teor em negro de carbono, a amostra exposta às condições atmosférica apresentou um valor de 2,64%.

No que se refere à tração e extensão na cedência os valores obtidos foram 37 kN/m e de 11% respetivamente. Para tração e extensão na rotura obtiveram-se valores de 25 kN/m e 379%. Estes valores foram inferiores aos obtidos para as amostras submersas, sugerindo que a exposição da geomembrana aos raios UV conduziu à diminuição da sua resistência à tração na rotura. Segundo Rowe *et al.* (2003), temperaturas elevadas também podem conduzir à diminuição da resistência à tração e endurecimento/amolecimento. O ozono pode levar ao aparecimento de fissuras, assim como os raios UV que ainda podem provocar endurecimento das geomembranas. A humidade elevada, por poder levar à absorção de água e conseqüente lixiviação do antioxidante, implica uma maior suscetibilidade das geomembranas à oxidação e aos raios UV. Em termos gerais, os autores concluíram que a amostra exposta aos raios solares foi a que apresentou maior degradação, pois os

resultados obtidos nos ensaios de determinação do tempo de oxidação à indução foram relativamente baixos, significando que os antioxidantes constituintes da geomembrana foram quase completamente consumidos, o que é coerente com os resultados obtidos para a tensão de rotura.

Um estudo realizado por Tarnowski & Baldauf (2012) debruçou-se sobre o comportamento de GMs de PEAD expostas às condições climáticas instaladas em 4 diferentes locais (dois na Alemanha, um no Irão e outro em Espanha). No Quadro 2.9 refere-se o local de exposição, os anos de instalação, o ano em que foi realizado o último ensaio e as espessuras das GMs. Segundo os autores, as geomembranas instaladas nos diferentes locais não foram fabricadas com o mesmo polímero.

Quadro 2.9 – Projetos de exposição de geomembranas de PEAD (adaptado de Tarnowski & Baldauf, 2012).

Projeto	Ano de instalação	Anos do último ensaio	Espessura (mm)
Galing I (Alemanha)	1974	2005	2.5
Galing II (Alemanha)	1984	2005	2.5
Sarchesmeh (Irão)	1975	2000	2.5
Levante (Espanha)	1994	2005	2.0

Neste estudo foram realizados ensaios laboratoriais de determinação das propriedades mecânicas das geomembranas (resistência à tração e extensão na cedência e na rotura) e do tempo de indução à oxidação (OIT).

Para as propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, os autores consideraram que apenas nas amostras com 31 anos (Galing I) de exposição foi detetado um decréscimo no valor das propriedades das GMs, indicando ter ocorrido depleção de antioxidantes. Nas GMs com 21 anos (Galing II) de exposição não se verificaram alterações significativas destas propriedades. Verificaram, também, que tanto as GMs que permaneceram expostas 11 anos, como as que estiveram intermitentemente cobertas com água, as suas propriedades mecânicas não sofreram alterações significativas.

Para o tempo de indução à oxidação, os autores indicam que houve consumo de antioxidantes (depleção) em todos os locais de exposição. No entanto, com o objetivo de compreender melhor o processo de depleção de antioxidantes, os autores realizaram separadamente ensaios de OIT, na superfície de topo (face exposta da geomembrana) e numa camada do interior da geomembrana para os dois locais de exposição na Alemanha, como se verifica no Quadro 2.10.

Quadro 2.10 – Teor de antioxidantes em diferentes camadas da GMs expostas em dois locais na Alemanha e com diferentes tempos de exposição (adaptado de Tarnowski & Baldauf, 2012).

OIT (min)	Galing I (Alemanha) 31 anos			Galing II (Alemanha) 21 anos		
	1995		2005		2005	
Face de ensaio	Face exposta	Face interior	Face exposta	Face interior	Face exposta	Face interior
200°C	7,1	8,8	0	4	5	65
190°C	13,8	20,9	0	8,5	10,5	148

Verificaram que, na face exposta durante 31 anos, não foram detectados antioxidantes e, na face interior, os antioxidantes ainda estavam presentes. No caso da geomembrana exposta durante 21 anos, a face exterior apresentou uma redução significativa de antioxidantes e na parte central não ocorreu nenhuma redução. Concluíram que, devido à presença de negro de fumo (antioxidante), a radiação UV penetra apenas na camada superior, assim, a espessura tem influência sobre a depleção de antioxidantes e na preservação da função de barreira da geomembrana, corroborando a teoria apresentada por Rowe *et al.* (2002), segundo a qual a migração para o exterior dos antioxidantes é mais lenta numa geomembrana com maior espessura.

No caso de Espanha, a zona da geomembrana permanentemente exposta às condições climáticas apresenta um maior consumo de antioxidantes que a zona intermitentemente coberta com água e detritos, que actuam protegendo do efeito nocivo da radiação UV. Os autores concluíram que as GMs se encontravam na Fase A correspondente à depleção de antioxidantes, sem alteração das propriedades mecânicas. Referem também que a espessura da GM é um aspeto importante para a sua durabilidade.

Recentemente, Rowe & Ewais (2014) analisaram o comportamento químico e mecânico de GMs de PEAD instaladas em dois locais com diferentes condições climáticas. Um situado na Argentina, nas instalações de uma mina desativada, onde as GMs permaneceram expostas a um clima ameno a quente (temperatura anual média variando entre os 20° e os 33°C e o IUV variando entre 4 e 18), durante cerca de 16 anos. O segundo situado no Canadá, nas instalações do centro de investigação, as GMs estiveram expostas às condições climáticas durante 6 anos, sujeitas a um clima ameno a frio (temperatura de anual média variando entre os -13 e os 27°C e o IUV variando entre 1 e 8).

Foram realizados ensaios laboratoriais para determinação do tempo de indução à oxidação, do índice de fluidez e de resistência à tração e extensão na cedência e na rotura para, sobre as amostras expostas e, no caso do Canadá, também sobre amostras não-expostas.

Para as GMs expostas na Argentina, o tempo de indução à oxidação apresentou valores muito baixos, próximos dos residuais, que são da ordem de 1 a 3 min, tendo os autores concluído que o antioxidante tinha sido praticamente consumido. Para as GMs expostas no Canadá, o tempo de indução à oxidação foi significativamente mais baixo que o inicial, demonstrando algum consumo de antioxidantes. De referir que as amostras instaladas numa zona de maior exposição aos raios solares (talude) apresentaram valores inferiores aos obtidos para as amostras colocadas numa zona de menor exposição (base). Segundo Rowe & Ewais (2014) esta diferença deveu-se à maior ou menor exposição à radiação UV.

Para o índice de fluidez, os resultados foram inconclusivos para as geomembranas expostas na Argentina e não foram relatados resultados para as amostras expostas no Canadá.

Para as propriedades mecânicas, verificou-se um decréscimo dos valores relativamente aos iniciais, o que foi atribuído pelos autores à uma alteração na estrutura morfológica, á degradação devida a foto-oxidação e à existência de fissuras e orifícios na superfície das geomembranas decorrentes da operação de instalação das geomembranas.

De acordo com os referidos autores, a temperatura da geomembrana influencia os resultados, na medida em que ao aumento da temperatura está associada uma maior taxa de degradação das propriedades. Esta conclusão é também corroborada por estudos realizados por Pelte *et al.* (1994), Hsuan & Koerner (1998); Sangam & Rowe (2002); Gulec *et al.* (2004) e Rowe *et al.* (2009, 2010). Segundo Pelte *et al.* (1994), a temperatura de uma geomembrana é função não só da radiação solar, mas também da temperatura do ar, das características das GM e dos solos subjacentes. A cor da GM tem também grande importância. A cor preta aumenta a absorção de radiação solar e consequentemente a temperatura.

Rowe & Ewais (2014) propuseram uma relação entre a temperatura da GM e a taxa de degradação das geomembranas de cor preta (Quadro 2.11), a qual deve ser usada apenas como um indicador, pois carece ainda de estudos para verificação.

Quadro 2.11 – Relação entre a vida útil de uma GM sujeita a diferentes temperaturas de serviço com a vida útil para uma temperatura de 85°C (adaptado de Rowe & Ewais, 2014).

Temperatura da GM	Relação da vida útil	Taxas de degradação
20	180	Baixa
25	100	--
30	61	Moderada
35	38	--
40	24	Alta
45	15	Alta
50	10	--
55	6,6	Muito alta
60	4,6	Muito alta
65	3,2	Muito alta
70	2,4	--
75	1,8	Extrema
80	1,4	Extrema
85	1,0	Extrema

De uma forma geral, Rowe e Ewais (2014) concluíram que a vida útil de uma GM depende da aplicação e das condições de exposição, no entanto, para as mesmas condições de exposição, a vida útil diminui muito com o aumento de temperatura.

Num estudo realizado por Lodi *et al.* (2007), com base em ensaios de determinação do índice de fluidez e de tempo de indução à oxidação, duas amostras de geomembranas de PEAD foram expostas às condições climáticas nas instalações do Laboratório de Engenharia Civil da Ilha Solteira durante sete anos. As amostras expostas possuíam diferentes espessuras (0,8 mm e 2,5 mm). Foram realizados ensaios de determinação do índice de fluidez (MFR - ASTM D1238) e de determinação do

tempo de indução à oxidação (OIT - ASTM D3895) antes e após exposição. Os resultados obtidos pelos autores apresentam-se nos Quadro 2.12 e 213.

Quadro 2.12 – Resultados do MFR (adaptado de Lodi *et al.*, 2007).

HDPE (mm)	MFR (g/10 min)		Variação (%)	Possível causa
	Intacta (i)	Exposta (e)		
0,8	0,1778	0,2515	(+41,45(e))	RC (e)
2,5	0,1460	0,2612	(+78,90(e))	RC (e)

RC – rotura nas cadeias poliméricas

Quadro 2.13 – Resultados do OIT (adaptado de Lodi *et al.*, 2007).

HDPE (mm)	OIT (min)	
	Inicial	Exposta
0,8	12,55	1,20
2,5	10,05	0,8

Os autores observaram que valores de MFI obtidos para as geomembranas expostas foram consideravelmente maiores que os obtidos para as amostras intactas. Referem também que se ocorrer aumento do MFI, a massa molecular decresce e ocorre cisão nas cadeias poliméricas. A cisão das cadeias poliméricas, o que torna o polímero mais quebradiço e sensível ao fenómeno de *stress cracking* (resistência à fissuração).

Para a análise dos resultados dos ensaios de OIT, os autores utilizaram as recomendações da especificação GM13 do GRI por a norma ASTM D3895 não fazer nenhuma recomendação acerca dos valores mínimos de OIT e das percentagens aceitáveis após degradação. De acordo com a GM13, os valores mínimos aceitáveis de OIT para as geomembranas lisas e texturadas, independentemente da espessura é de 100 minutos. Assim, os resultados obtidos foram relativamente baixos tanto para as amostras intactas como para as expostas. Comparando os valores de OIT com os valores de MFR, nota-se que há uma concordância dos resultados indicando a existência de um processo degradativo oxidativo nas geomembranas. No entanto os autores referem que se deve ter em consideração que o ensaio STd-OIT a 200°C com pressão de 35 kPa pode conduzir a resultados equívocos principalmente para antioxidantes do tipo HALS. Tendo concluído que as análises térmicas (MFR e OIT) evidenciaram que, o processo de degradação do material já se tinha iniciado. Os autores referem que, pela eficiência demonstrada por esses ensaios na identificação dos processos degradativos, as análises térmicas (MFR e OIT) devem ser utilizadas em qualquer tipo de avaliação da qualidade e durabilidade das geomembranas.

2.7 Considerações finais

Neste capítulo, apresentaram-se os diferentes tipos de geossintéticos e as suas funções. Indicaram-se também as principais aplicações dos geossintéticos em obras rodoviárias.

De uma forma resumida, foram apresentadas algumas definições teóricas que se consideraram necessárias para a compreensão dos mecanismos de degradação das geomembranas de PEAD.

Foram identificados os mecanismos e as fases de degradação dos polímeros. Identificaram-se dois tipos de degradação: a degradação química devida à radiação UV (foto-oxidação) e a degradação por oxidação devida ao efeito da temperatura.

Foram abordadas do ponto de vista teórico as propriedades que se consideraram relevantes (massa volúmica; índice de fluidez; resistência à tração e extensão na cedência e na rotura; teor em negro de carbono e o tempo de indução à oxidação) e como estas evoluem quando as geomembranas PEAD se encontram expostas às condições climáticas.

Na revisão bibliográfica foram analisados alguns artigos de estudos realizados recentemente por Rowe *et al.* (2003), Lodi *et al.* (2007), Tarnowski & Baldauf (2012) e Rowe & Ewais (2014) em geomembranas de PEAD expostas às condições climáticas em diferentes locais do mundo, onde sugerem que a vida útil das geomembranas está dependente das condições de exposição das mesmas.

3 | Trabalho experimental

3.1 Considerações iniciais

No presente capítulo são descritas as condições de exposição das amostras, a sua localização geográfica em Portugal e são apresentados as características das geomembranas ensaiadas. São também apresentados os ensaios realizados, e as respetivas normas de ensaio, com vista a avaliar a evolução das propriedades mecânicas e químicas das geomembranas de PEAD expostas às condições climáticas durante um período de cerca de 12 anos.

3.2 Amostras e sua localização

A análise da alteração das propriedades de GMs de PEAD com o tempo de vida realizou-se sobre amostras expostas e não-expostas aos agentes climáticos. Para o efeito, começou-se por dividir as amostras em duas partes com uma soldadura dupla a meio (Figura 3.1), uma parte foi enviada ao LNEC para guardar não-exposta (Arquivo), e a outra parte permaneceu exposta em oito diferentes locais do país (Figura 3.2) nomeadamente em Valença, Viana do Castelo, Boticas, Vila Nova de Gaia, Bigorne, Aveiro, Figueira da Foz e Loulé, procurando abranger as diferentes zonas climáticas.

As amostras expostas foram, por sua vez, divididas em duas partes, uma das quais foi coberta com geotêxtil (referenciada como coberta). A parte não coberta foi designada por exposta. Estas foram colocadas em taludes de fácil acesso, ou em coberturas de edifícios (Figura 3.3 a 3.10).

De referir que, para arquivo, apenas foi enviada ao LNEC a geomembrana de Viana do Castelo (designada por parte 1 na Figura 3.1). Por outro lado, em apenas três locais (Aveiro, Loulé e Boticas) existem amostras cobertas com geotêxtil.

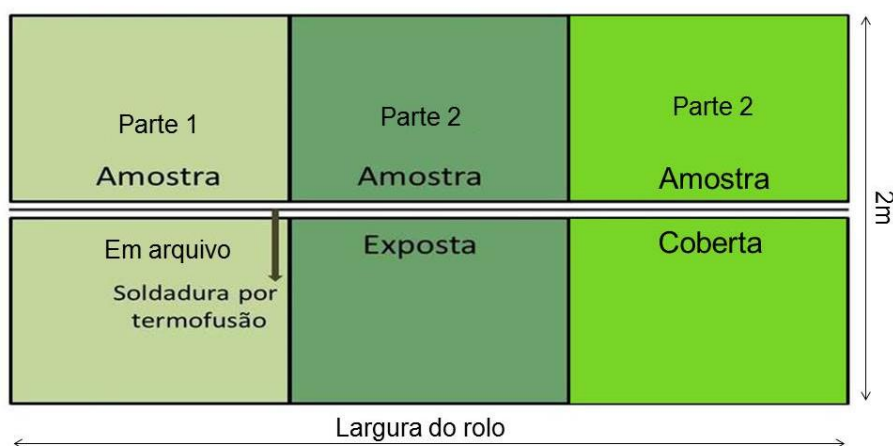


Figura 3.1 – Representação esquemática das amostras expostas e não expostas.

Algumas das geomembranas usadas na preparação das amostras foram providenciadas pelo mesmo fabricante. Estão nestas condições as geomembranas expostas em Valença, Vila Nova de Gaia e Aveiro e as geomembranas expostas na Figueira da Foz e Loulé, sendo designadas por GM-A e GM-B, respetivamente.

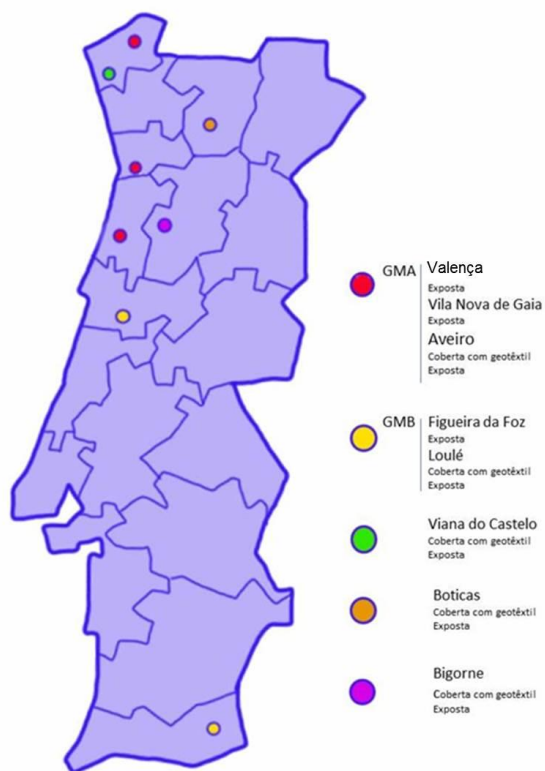


Figura 3.2 – Locais de exposição das geomembranas no país.

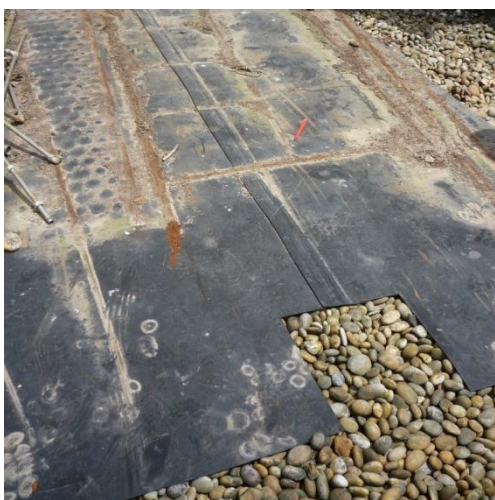


Figura 3.3 – Viana do Castelo: amostra exposta sobre uma cobertura.



Figura 3.4 – Valença: amostra exposta no solo.



Figura 3.5 – Vila Nova de Gaia: amostra exposta sobre um painel.



Figura 3.6 – Aveiro: amostra exposta sobre uma cobertura.



Figura 3.7 – Figueira da Foz: amostra exposta sobre uma cobertura.



Figura 3.8 – Boticas: amostra exposta no talude.



Figura 3.9 – Bigorne: amostra exposta sobre uma cobertura.



Figura 3.10 – Loulé: amostra exposta sobre uma cobertura.

As geomembranas avaliadas permaneceram expostas durante 12 anos em, Boticas, Bigorne, Viana do Castelo, Valença, Vila Nova de Gaia, Aveiro, Figueira da Foz e em Loulé.

No Quadro 3.1 apresentam-se as principais características das geomembranas de PEAD em estudo, de acordo com a sua localização, obtidas com base nas fichas técnicas ou em ensaios laboratoriais, realizados pelo fabricante no âmbito do seu controlo de fabrico e disponibilizados aquando da realização das amostras, ou realizados pelo LNEC sobre a amostra de arquivo.

Quadro 3.1 – Resumo das principais características das geomembranas de PEAD.

Principais características das Geomembranas	Locais de exposição às condições climáticas				
	Viana do Castelo	GM-A	GM-B	Boticas	Bigorne
Espessura (mm) ASTM D751	2	2	2	2	2
Massa surfácica (g/cm ²) EN 965	1920	1920	1900	*	*
Massa volúmica (g/cm ³) ASTM D792	0,946 (0,945)	0,942	0,940	≥0,945	0,940
Resistência à tração na cedência (kN/m) ASTM D6693	34 (36,5)	34 (31,9)	30 (40,5)	37	34
Extensão na cedência (%) ASTM D6693	13 (14,7)	10 (13,2)	10 (10,4)	10	11
Resistência à tração na rotura (kN/m) ASTM D6693	55 (44,7)	55 (68,1)	55 (58,9)	56	70
Extensão na rotura (%) ASTM D6693	700 (830,2)	700 (578,2)	>700 (790,2)	>700	≥750
Teor em negro de carbono (%) ASTM D1603	2-3 (2,1)	*	2,0	2-3	2-3
Tempo de indução à oxidação OIT (min) ASTM D3895	100 (82,2)	*	*	*	100
Índice de fluidez (190°C/5kg) (g/10 min) NP EN ISO 1133	* (2,37)	2,4 (0,96)	0,6-1,8 (0,82)	1,0	1,0

Legenda:

GM-A – Valença, Vila Nova de Gaia, Aveiro; GM-B – Figueira da Foz, Loulé.

*sem informação disponível; Arquivo;

(xxx) ensaios laboratoriais.

3.3 Métodos de ensaio

3.3.1 Programa de ensaios

As propriedades das geomembranas de PEAD a longo prazo são afetadas pela degradação que os materiais sofrem, sobretudo, em consequência da foto-oxidação (degradação devida aos raios UV) e da termo-oxidação (degradação térmica).

A exposição da geomembrana aos raios UV tem efeitos que vão desde o endurecimento, à redução de resistência à tração, rasgamento e deformação. Temperaturas elevadas também podem conduzir à diminuição da resistência à tração e endurecimento/amolecimento. A degradação da camada de ozono conduz ao aumento de radiação UV que pode levar ao aparecimento de fissuras e ao endurecimento das geomembranas. A humidade elevada, por poder levar à absorção de água e consequente lixiviação do antioxidante, implica uma maior suscetibilidade das geomembranas à oxidação e aos raios UV (Haxo & Nelson, 1984).

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho consistiu na avaliação do estado das geomembranas ao fim de 12 anos de exposição a agentes atmosféricos, que incluiu, por um lado, o estudo da evolução das propriedades físicas mecânicas da geomembrana propriamente dita e, por outro lado, o estudo da evolução das propriedades mecânicas das soldaduras entre painéis realizadas por termofusão.

Para avaliar a evolução das propriedades das geomembranas de PEAD expostas às condições climáticas durante um período de 12 anos foram realizados ensaios físicos, mecânicos e químicos sobre as amostras expostas em diferentes locais do país. No Quadro 3.2 apresentam-se os ensaios laboratoriais realizados no presente estudo e as correspondentes normas de ensaio. Nas secções seguintes apresenta-se uma breve descrição dos ensaios e seus objetivos.

Quadro 3.2 – Lista de ensaios realizados para caracterização das geomembranas.

Norma de ensaio	Designação
ASTM D1505	Determinação da massa volúmica
ASTM D6693	Determinação da resistência à tração e extensão na cedência e na rotura
NP EN ISO 1133	Determinação do índice de fluidez
ASTM D1603	Determinação do teor em negro de carbono
ASTM D3895	Determinação do tempo de indução – OIT

No quadro 3.3 apresenta-se uma relação de todos os ensaios laboratoriais realizados no âmbito do presente trabalho.

Quadro 3.3 – Relação de ensaios realizados para caracterização das geomembranas.

Ensaio realizado	Amostras	Provetes	Nº de ensaios
Massa Volumica			
• exposta	8	3	24
• coberta	3	3	9
• arquivo	1	3	3
total	12	9	36
Tração/extensão na cedência e na rotura			
• exposta	8	5	40
• coberta	3	5	15
• arquivo	1	5	5
total	12	15	60
Índice de fluidez			
• exposta	8	5	40
• coberta	3	5	15
• arquivo	1	5	5
total	12	15	60
Teor em negro de carbono			
• exposta	8	2	16
• coberta	3	2	6
• arquivo	1	2	2
total	12	6	24
Tempo de indução à oxidação			
• exposta	8	2	16
• coberta	3	2	6
• arquivo	1	2	2
total	12	6	24

3.3.2 Ensaio de determinação da massa volúmica

A determinação da massa volúmica das geomembranas em estudo neste trabalho foi realizada segundo a norma “ASTM D1505-03 – Standard Test Method for Density of Plastics by the density-gradient technique”, por ser a mais utilizada para efetuar a determinações em matérias com massa volúmica inferior a 1,0 (g/cm³).

A determinação da massa volúmica foi efetuada segundo o método da coluna de gradiente de densidades (Figura 3.11). Neste método utiliza-se um tubo de vidro com dois líquidos de imersão com densidade diferente. Os líquidos de imersão recomendados para o material em estudo são o etilenoglicol/isopropanol que abrangem uma gama de massa volúmica de 0,79 até 1,11 g/cm³. O provete é colocado no interior da coluna e deixa-se estabilizar. Lê-se a altura do provete e dos flutuadores posicionados acima e abaixo do provete tomando o flutuador como referência (a altura dos flutuadores é fornecida por uma tabela elaborada aquando da calibração e do enchimento da coluna) e toma-se a média dos três valores.

A massa volúmica é calculada através da seguinte expressão:

$$\text{Massa volumica no ponto } x = a + \left[\frac{(x - y)(b - a)}{(z - y)} \right] \quad (3.1)$$

Em que:

a – massa volúmica do flutuador situado abaixo da amostra em g/cm³;

b – massa volúmica do flutuador situado acima da amostra g/cm³;

x – altura do provete na coluna em mm;

y – altura do flutuador na coluna abaixo da amostra em mm;

z – altura do flutuador na coluna acima da amostra em mm.



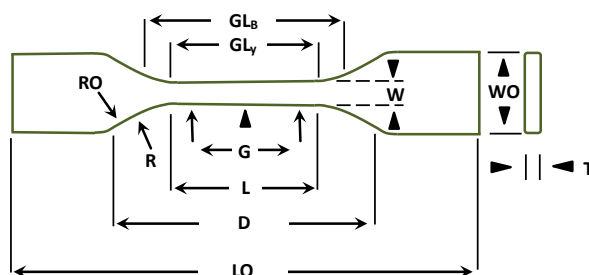
Figura 3.11 – Equipamento de ensaio - Coluna de gradiente de densidades.

Os resultados são apresentados em valor médio por amostra de três provetes em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3). A norma de ensaio preconiza que os valores da massa volúmica devem ter uma precisão de cerca de 0,05%.

3.3.3 Ensaio de determinação da resistência à tração e extensão na cedência e na rotura

A determinação da resistência à tração e extensão na cedência e na rotura foi efetuada de acordo com a norma de ensaio “ASTM D6693 (2004) – Standard test method for determining tensile properties of non-reinforced polyethylene and non-reinforced flexible polypropylene geomembranes”.

A norma recomenda para geomembranas não reforçadas e com espessuras superiores ou iguais a 2 mm a utilização de provetes em forma de haltere (Figura 3.12) com dimensões específicas (tipo IV na norma).



Dimensões do provete tipo IV (haltere) de espessura, T (mm)		
Descrição	Dimensões (mm)	Tolerância (mm)
W - largura de seção estreita	6	$\pm 0,5$
L - comprimento de seção estreita	33	$\pm 0,5$
GL _y – comprimento de extensão	33	$\pm 0,5$
GL _B – comprimento de rotura	50	$\pm 0,5$
WO – largura total	19	$\pm 6,4$
LO – comprimento total	115	Sem máx e mín
G – comprimento útil	25	$\pm 0,5$
D – distância entre garras	65	$\pm 0,13$
R – raio interno	14	± 1
RO – raio externo	25	± 1

Figura 3.12 – Forma e dimensões dos provetes segundo a norma ASTM D6693.

Para a realização deste ensaio, as amostras foram previamente condicionadas à temperatura e humidade relativa do laboratório de ensaios ($T = 23 \pm 2$ °C e $H_r = 50 \pm 5$ %). Após 24 horas, de cada amostra foram cortados cinco provetes na direção de fabrico e cinco na direção transversal. Os provetes foram colocados na prensa (Máquina Universal de ensaios mecânicos da marca Instron, modelo 4302), tal como ilustrado na Figura 3.13.

Foi utilizada uma célula de carga de 10 kN, classe: 0,5. A velocidade de ensaio foi de 50mm/min, como recomenda a norma. Foram registados os valores da força/extensão de cada um dos provetes sob a forma de gráfico, e registados os valores individuais de força e deformação na cedência e de força e extensão na rotura. Na Figura 3.14 apresenta-se um provete antes e após ensaio.

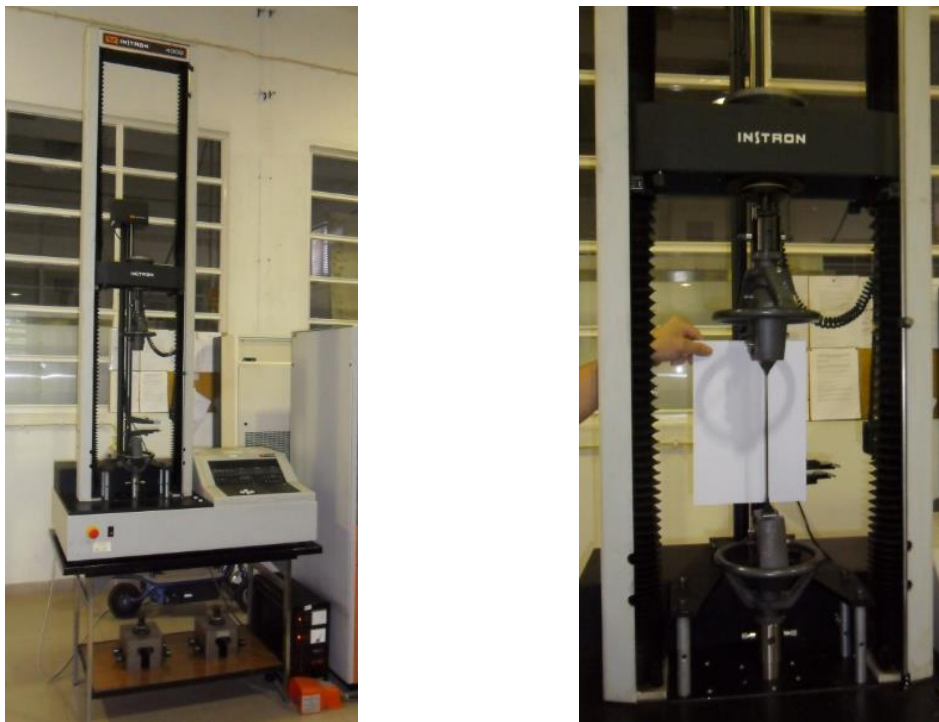


Figura 3.13 – Equipamento de ensaio: Prensa.

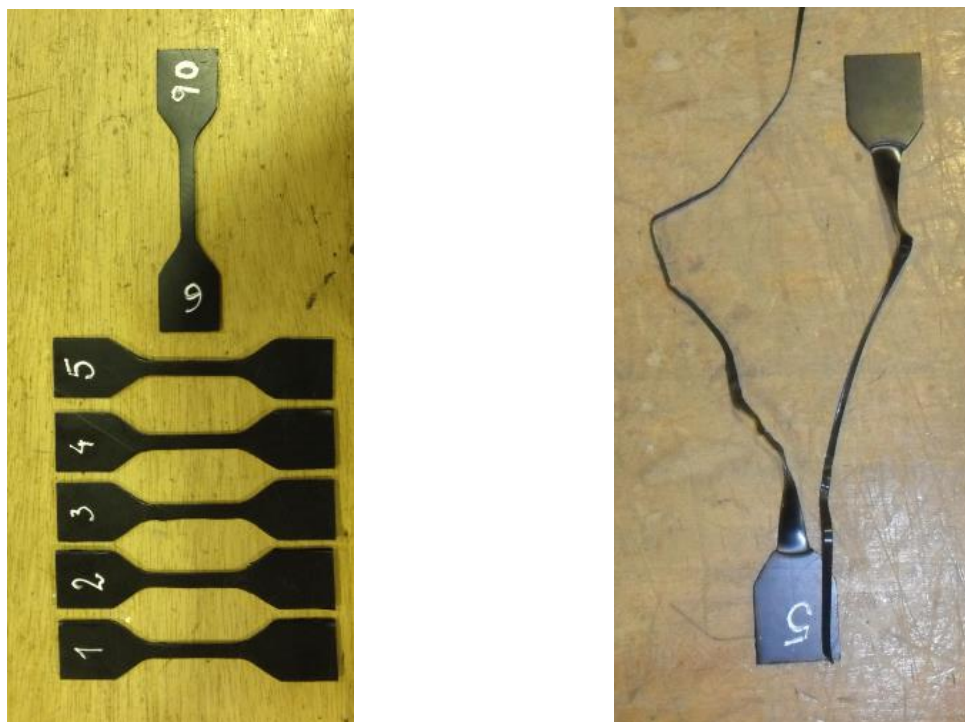


Figura 3.14 – Provetes antes e após ensaio, na prensa.

Para a determinação da resistência à tração na cedência, usa-se a força correspondente ao ponto de cedência em Newton (considera-se cedência o ponto onde a reta tangente ao gráfico força/extensão tem declive nulo) e divide-se essa força pela largura mínima inicial do provete em metros. Para a determinação da resistência à tração na rotura usa-se a força correspondente ao ponto de rotura em Newton (ponto de colapso total do provete) e divide-se a força pela largura mínima do provete em metros. Os resultados são expressos em N/mm, que é equivalente a kN/m.

A extensão na cedência corresponde à razão entre a variação do comprimento do provete no momento da cedência e o comprimento inicial GL_Y , (GL_Y - base de medida correspondente à área calibrada do provete para cálculo da extensão na cedência), multiplicado por 100.

A extensão na rotura corresponde à razão entre a variação do comprimento do provete no momento da rotura e o comprimento inicial GL_B , (GL_B - base de medida correspondente a área calibrada do provete para cálculo de extensão na rotura), multiplicado por 100. Na Figura 3.15 é apresentada uma curva experimental do ensaio de determinação da resistência à tração e extensão na rotura de uma geomembrana.

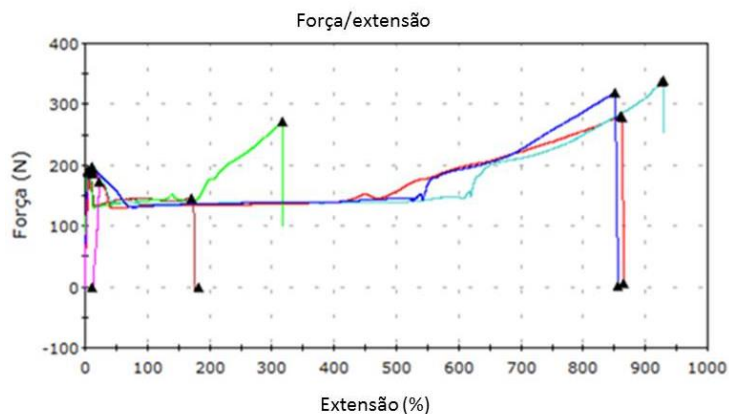


Figura 3.15 – Curva experimental do ensaio de determinação da resistência à tração e extensão na rotura de uma geomembrana.

Os resultados são apresentados em valor médio por amostra e desvio padrão por amostra ensaiada.

3.3.4 Ensaio de determinação do índice de fluidez

A determinação do índice de fluidez foi efetuada de acordo com a norma de ensaio “NP EN ISO 1133 (2007) – Determinação do índice de fluidez em massa (MFR) e em volume (MVR) dos materiais termoplásticos”.

A determinação do índice de fluidez foi realizada com um equipamento denominado Plastómetro de extrusão da marca CEAST (Figura 3.16) e foi utilizado o método B, de acordo com a norma de ensaio. Coloca-se o provete previamente cortado no cilindro, e comprime-se. Deve-se ter cuidado para que o material fique isento de ar tanto quanto possível, para isso a operação de colocação do material no

cilindro deve ser o mais rápida possível. Programa-se o *software* para que a distância ao êmbolo seja de 6,35 mm. Coloca-se o êmbolo no cilindro, e inicia-se o ensaio com um período de pré-aquecimento do provete de 5 min, e coloca-se a carga amovível respectiva de 5kg (Figura 3.17), deixa-se o êmbolo descer sob o efeito da gravidade até que seja extraído um primeiro provete extrudido (filamento isento de bolhas) que é rejeitado, seguidamente são recolhidos os provetes extrudidos que são analisados com o objetivo de verificar se existem imperfeições. Se existirem imperfeições os provetes serão rejeitados. A duração do ensaio não deve exceder os 25 minutos. Terminado o ensaio e após o arrefecimento do provete extrudido, pesa-se o mesmo e introduz-se o valor obtido no campo destinado à massa no *software* do equipamento que calcula o índice de fluidez.

Segundo a norma NP EN ISO 1133, o índice de fluidez corresponde à velocidade de extrusão de uma resina fundida através de uma fieira de comprimento e diâmetro especificados, sob condições previamente estabelecidas de temperatura, de carga e distância percorrida pelo êmbolo (no interior do cilindro do plastómetro de extrusão). Este parâmetro pode ser expresso em termos de massa extrudida por intervalo de tempo especificado, (índice de fluidez em massa) ou expresso em termos de volume extrudido por intervalo de tempo especificado, (índice de fluidez em volume). A grandeza determinada para a realização do presente trabalho foi o índice de fluidez em massa (MFR), expresso em gramas por 10 minutos. Na Figura 3.18 pode ver-se o aspeto do material antes e após ensaio.



Figura 3.16 – Equipamento de ensaio - Plastómetro de extrusão CEAST.



Figura 3.17 – Êmbolo com carga amovível.



Figura 3.18 – Provette antes e após ensaio no plastómetro de extrusão.

São efetuados cinco ensaios por amostra. Os resultados são apresentados em valor médio por amostra em gramas por 10 minutos (g/10min).

3.3.5 Ensaio de determinação do teor em negro de carbono

A determinação do teor em negro de carbono foi realizada de acordo com a norma de ensaio “ASTM D1603 (2006) – Standard test method for carbon black content in olefin plastics”.

A determinação do teor deste composto foi realizada por análise gravimétrica após pirólise da amostra sob uma atmosfera de azoto.

O equipamento de determinação do teor em negro de carbono está representado nas Figura 3.19 e 3.20.



Figura 3.19 – Equipamento para determinação do teor em negro de carbono.



Figura 3.20 – Mufla para oxidação do negro de carbono.

Resumidamente, o procedimento de ensaio consiste em pesar um cadinho previamente aquecido até 600°C e posteriormente arrefecido até temperatura ambiente num exsicador e determinar a sua massa (w_1). Colocar o provete no interior do cadinho (Figura 3.21) e registar a sua massa, (w_2). Aquecer a mufla até a temperatura constante de 600°C e colocar o cadinho no tubo de combustão, na zona menos quente da mufla (Figura 3.22), durante 5 minutos sob atmosfera de azoto (fluxo de 1,7 l/min). Arrastar o tubo de combustão para a zona mais quente da mufla até serem atingidos 600°C. Deixar que a pirólise ocorra durante cerca de 30 minutos. Mover o tubo de combustão novamente para a zona menos quente da mufla e deixar arrefecer durante 5 minutos, mantendo o fluxo de azoto. Retirar o cadinho e colocar num exsicador até que o mesmo arrefeça e pesar (w_3). Recolocar o cadinho na mufla (Figura 3.20) durante cerca de 10 minutos para proceder à calcinação do negro de carbono, depois remover e colocar no exsicador para arrefecer até à temperatura ambiente e determinar a massa (w_4).



Figura 3.21 – Provete para o ensaio de determinação do teor em negro de carbono.



Figura 3.22 – Colocação de um provete na mufla.

O teor em negro de carbono é expresso em percentagem (%), sendo calculado através da seguinte expressão:

$$\text{Teor em negro de carbono (\%)} = \frac{(W_r - W_0)}{W_s} \times 100 \quad (3.2)$$

Sendo que:

- $W_r = w_3 - w_1$ = massa do resíduo (g) após a pirólise com azoto (N_2);
- $W_0 = w_4 - w_1$ = massa do resíduo (g) após a calcinação ao ar;
- $W_s = w_2 - w_1$ = massa do provete (g).

Ensaiam-se dois provetes por amostra, sendo os resultados apresentados em termos de valor médio.

3.3.6 Ensaio de determinação do tempo de indução à oxidação (OIT)

A determinação do tempo de indução – OIT foi realizada de acordo com a norma de ensaio “ASTM D 3895 (2007) – Standard test method for oxidative induction time of polyolefins by Differential Scanning Calorimetry”.

O ensaio consiste em determinar o tempo em minutos necessário para que o material em ensaio (geomembrana) seja oxidado a uma temperatura específica. O equipamento utilizado na realização dos ensaios foi um Calorímetro diferencial de varrimento, marca SETARAM, modelo DSC92 tipo “por fluxo de calor” como se ilustra na Figura 3.23.

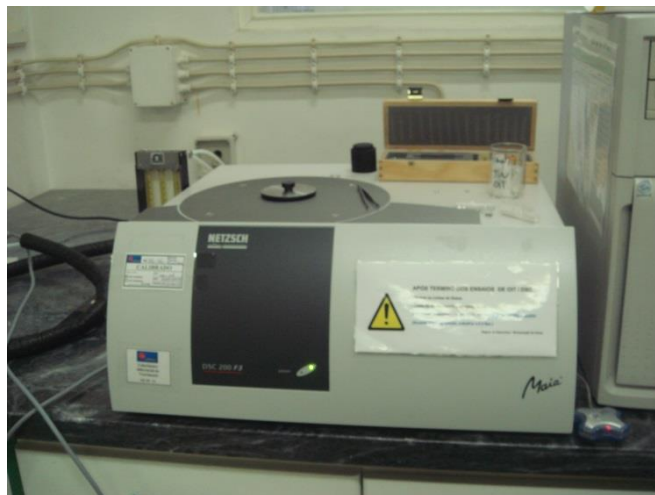


Figura 3.23 – Calorímetro diferencial de varrimento, marca SETARAM, modelo DSC92.

Na fase inicial do ensaio os provetes são mantidos à temperatura constante. Em seguida efetua-se uma rampa de aquecimento a uma taxa de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até serem atingidos 200°C numa atmosfera de azoto (N_2). Atingidos os 200°C faz-se um patamar de 5 minutos. Efetua-se a mudança para oxigénio (O_2) e injeta-se a uma taxa de $50 \text{ ml}/\text{min}$ durante 10 minutos a 200°C .

O valor do tempo de indução à oxidação é obtido graficamente, correspondendo ao tempo decorrido desde a adição de oxigénio até à oxidação completa do provete em ensaio (Figura 2.25).

São ensaiados dois provetes por amostra e são determinados os valores: médio, máximo e mínimo, e são apresentados em minutos.

De referir que, no âmbito do presente trabalho, foi realizado um estudo de intercomparação entre o LNEC e o TR/Environmental Inc. (Austin). Para o efeito, ambos os laboratórios ensaiaram a mesma geomembrana. Os resultados obtidos foram semelhantes, diferindo apenas em cinco minutos, pelo que se concluiu que os resultados eram consistentes.

3.4 Considerações finais

Neste capítulo foram descritas as condições de exposição das geomembranas, foram identificados os locais onde foram expostas geomembranas iguais (fabricadas com o mesmo polímero) que foram designadas por GMA e GMB. Indicou-se a sua localização em Portugal e as principais características dos materiais ensaiados constantes nas fichas técnicas dos diferentes materiais em estudo, bem como alguns ensaios realizados pelo fabricante e pelo LNEC.

Realizou-se uma breve descrição dos métodos de ensaio levados a cabo no LNEC, com o objectivo de identificar a evolução das características químicas, físicas e mecânicas das geomembranas expostas em diferentes localizações no país.

As propriedades determinadas através dos ensaios acima descritos quando analisadas em conjunto podem contribuir para a compreensão do estado de degradação destes tipo de materiais como já foi referido anteriormente no capítulo 2.

4 | Apresentação dos resultados

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados sobre amostras de geomembranas (massa volúmica, resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, índice de fluidez, teor em negro de carbono e do tempo de indução à oxidação), nas condições de exposição descritas no capítulo anterior, isto é, cobertas ou não com geotêxtil, com o objetivo de avaliar a evolução das suas propriedades quando expostas às condições atmosféricas durante cerca de 12 anos, em vários os locais do país, de norte a sul, bem como sobre as amostras de arquivo, quando existentes, usadas como referência. Saliencia-se que, para arquivo, apenas foi enviada ao LNEC a geomembrana de Viana do Castelo e foi denominada de *GM-arq*, pelo que, para simplificar, os resultados foram incluídos nos gráficos das geomembranas cobertas.

Para uma maior facilidade de escrita, as geomembranas que se encontravam expostas mas cobertas com geotêxtil foram denominadas como *GM-cob*, e as geomembranas exposta sem geotêxtil foram designadas por *GM-exp*. Dos oito locais de exposição, em apenas três (Aveiro, Boticas e Loulé) foi possível avaliar as propriedades das GMs na situação de *GM-cob*, uma vez que nos restantes locais as amostras se encontravam expostas sem geotêxtil.

Os valores obtidos experimentalmente para as diferentes propriedades são representados sob a forma de gráfico de barras e incluem a representação do desvio padrão. Embora possa ser questionável o uso deste parâmetro de cálculo face ao número reduzido de provetes ensaiados, optou-se por utilizá-lo para dar uma ideia da dispersão dos resultados em virtude da heterogeneidade dos mesmos.

4.2 Massa volúmica

Nas Figura 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente da massa volúmica para as amostras expostas com cobertura de geotêxtil (*GM-cob*), em Aveiro, Boticas e Loulé, para a GM de arquivo (*GM-arq*), em Viana do Castelo, e para as amostras expostas sem geotêxtil (*GM-exp*) em Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne Valença e Figueira da Foz.

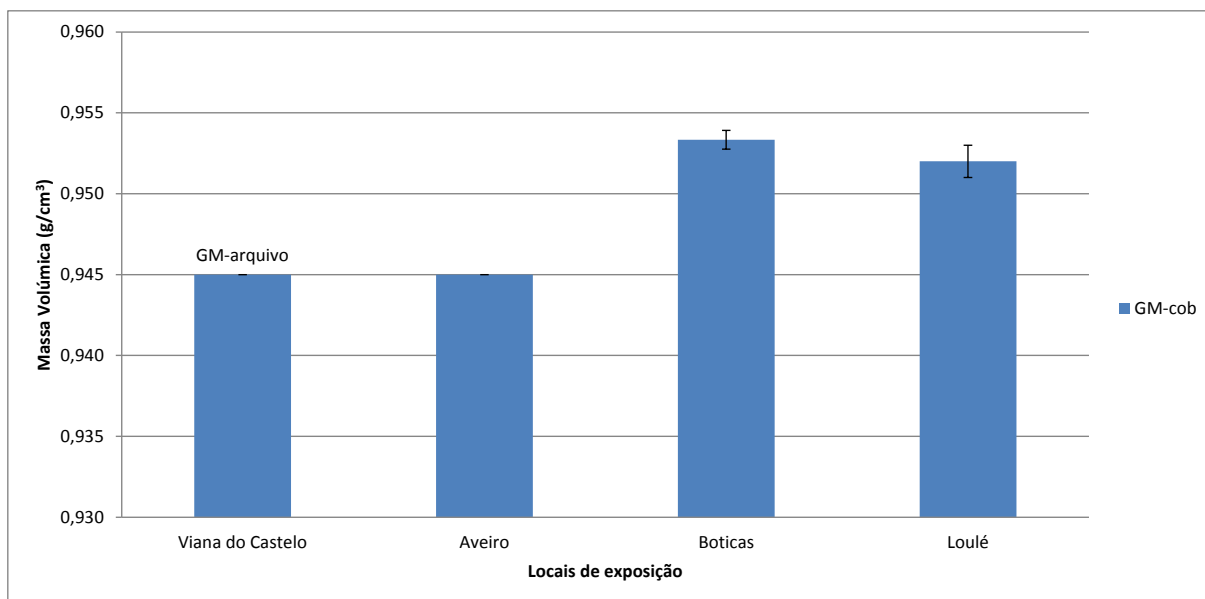


Figura 4.1 – Massa volúmica – GM em arquivo e *GM-cob*.

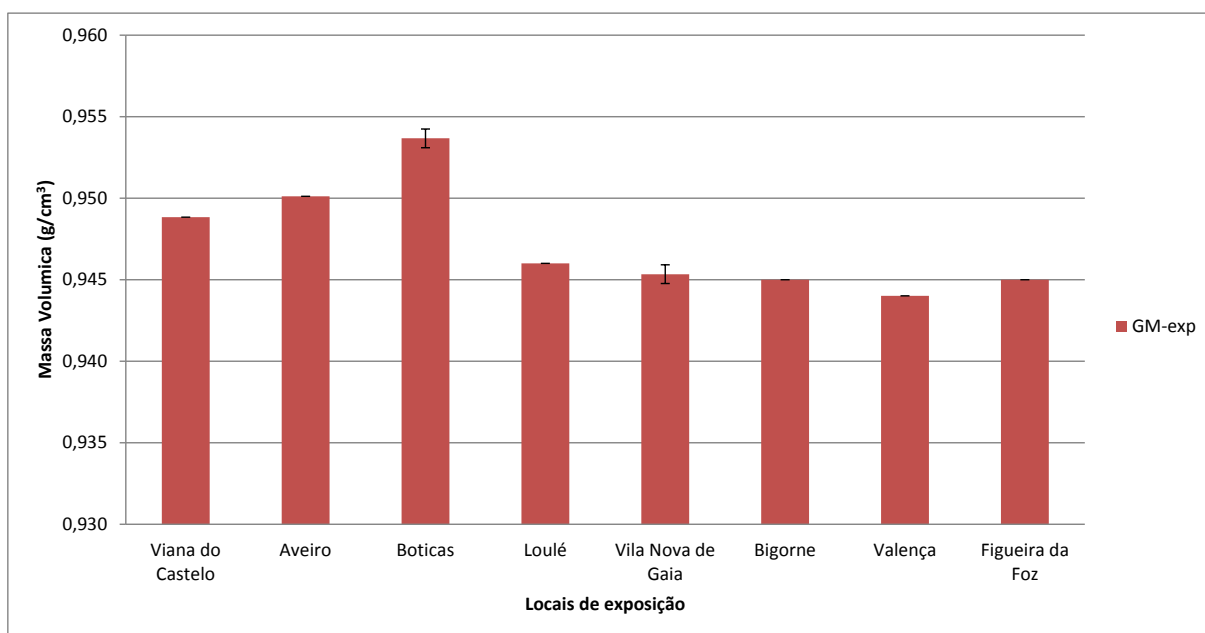


Figura 4.2 – Massa volúmica – *GM-exp*.

Verifica-se que tanto para a *GM-cob* como para a *GM-exp* a dispersão dos resultados, expressa pelo desvio padrão, é praticamente nula, à exceção das amostras de Boticas e Loulé (*GM-cob*) e Vila Nova de Gaia e Boticas (*GM-exp*), sendo no entanto pouco expressiva. O mesmo comentário pode tecer-se relativamente à amostra *GM-arq*.

Comparando os valores da massa volúmica obtidos nos diferentes locais, observa-se que, para a *GM-cob*, a diferença entre os valores máximo e mínimo é de $0,008 \text{ g/cm}^3$. As amostras de Viana do Castelo (*GM-arq*) e Aveiro têm valores iguais de $0,945 \text{ g/cm}^3$. Nas amostras de Boticas e Loulé os

valores obtidos são semelhantes, variando entre 0,953 e 0,952 g/cm³. Para a *GM-exp* observa-se uma maior variabilidade nos resultados, sendo a diferença entre os valores máximo e mínimo de 0,010 g/cm³.

De referir que os valores da *GM-exp* das amostras de Viana do Castelo e Aveiro foram superiores aos obtidos para a *GM-cob* (Aveiro) e *GM-arq.* (Viana do Castelo), contrariamente ao que seria esperado.

4.3 Resistência à tração e extensão na cedência e na rotura

Nas Figura 4.3 a 4.6 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente da resistência à tração e extensão na cedência e na rotura para as amostras de Viana do Castelo (*GM-arq*) e para as amostras expostas com cobertura de geotêxtil (*GM-cob*) em Aveiro, Boticas e Loulé.

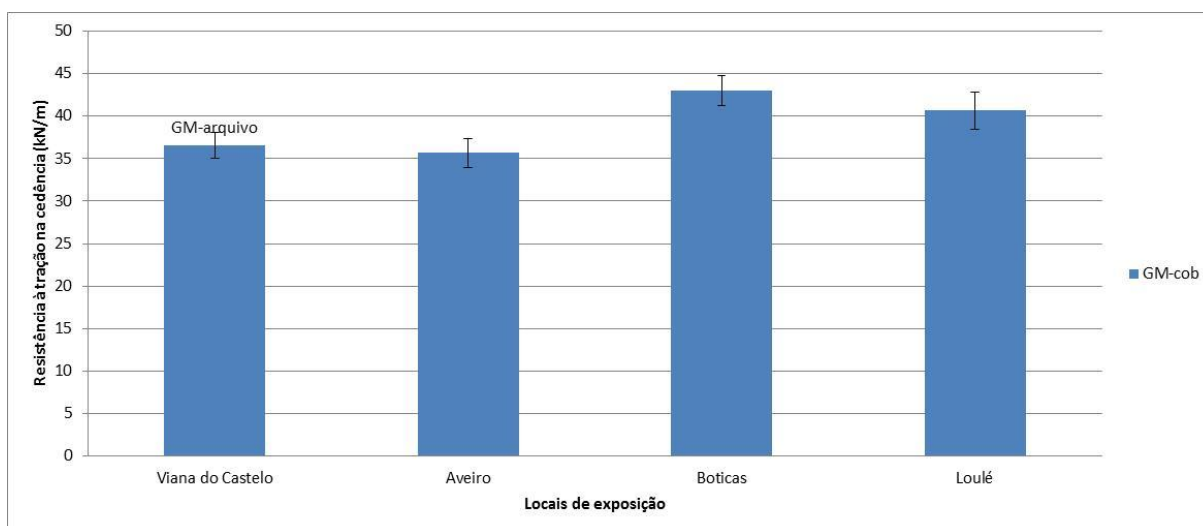


Figura 4.3 – Resistência à tração na cedência – *GM-arq* e *GM-cob*.

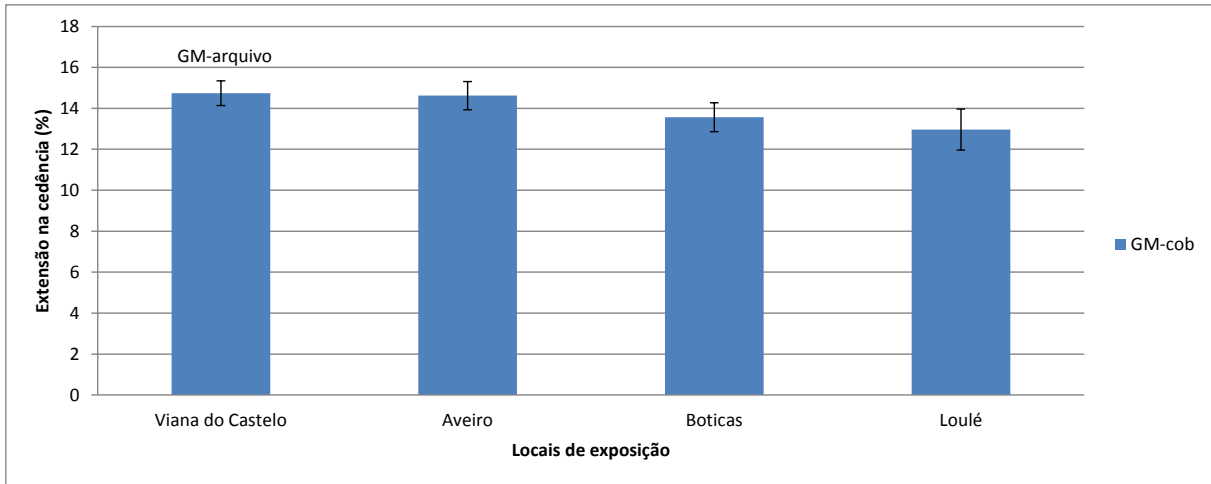


Figura 4.4 – Extensão na cedência – *GM-arq* e *GM-cob*.

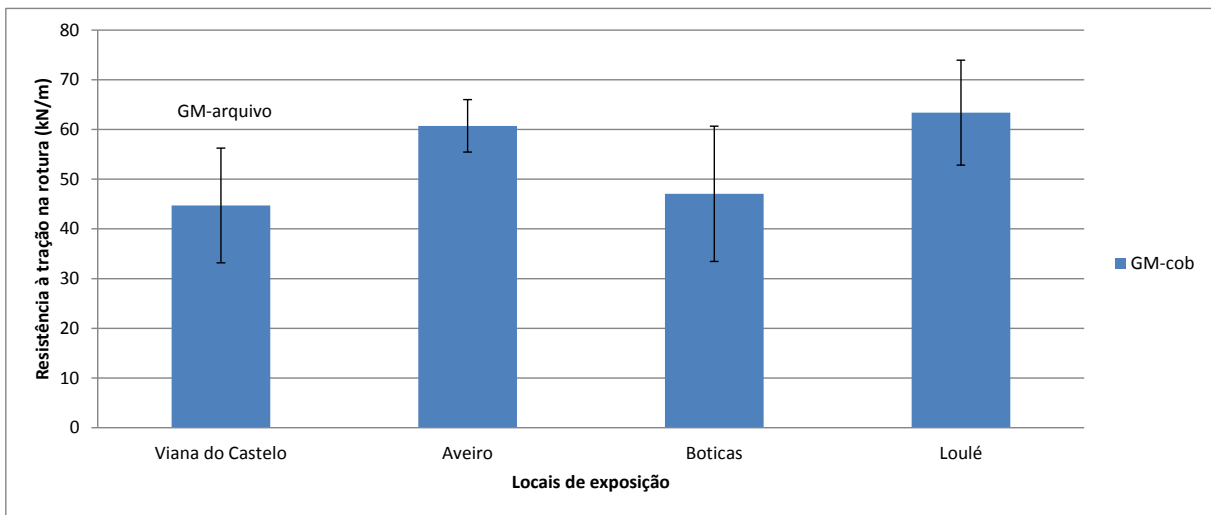


Figura 4.5 – Resistência à tração na rotura – *GM-arq* e *GM-cob*.

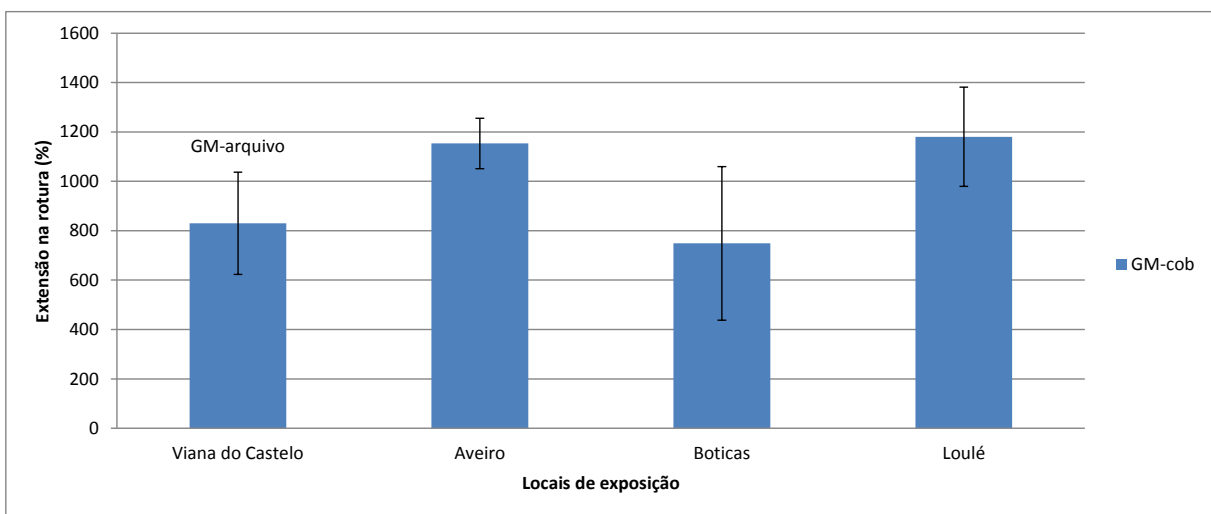


Figura 4.6 – Extensão na rotura – *GM-arq* e *GM-cob*.

Verifica-se, pela observação do desvio padrão, que a dispersão dos resultados, quer para a *GM-cob*, quer para a *GM-arq*, é pouco significativa, no caso da resistência à tração e da extensão na cedência, e bastante significativa, no caso da resistência à tração e da extensão na rotura.

Para a resistência à tração na cedência, para as amostras designadas por *GM-cob*, o valor máximo ocorreu na amostra de Boticas, tendo sido 43,0 kN/m, e o mínimo nas amostras de Aveiro, de 35,7 kN/m, sendo a diferença entre estes valores, de 7,3 kN/m.

Para a extensão na cedência, o valor máximo ocorreu na amostra de Viana do Castelo (*GM-arq*), com o valor de 14,7%, e o mínimo de 13,0% na amostra de Loulé, sendo a diferença entre o máximo e o mínimo de 1,8%.

Para a resistência à tração na rotura, obteve-se um valor máximo 63,4 kN/m, na amostra de Loulé, e mínimo de 44,7 kN/m, na amostra de Viana do Castelo (*GM-arq*), sendo a diferença de 18,7 kN/m.

A extensão na rotura apresentou um valor máximo de 1180,4 %, na amostra de Loulé, e um mínimo de 749,0%, na amostra de Boticas, sendo a diferença de 431,4%.

Nas Figura 4.7 a 4.10 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente para as amostras expostas (*GM-exp*) em Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne Valença e Figueira da Foz, respetivamente para a resistência à tração na cedência, a extensão na cedência, a resistência à tração na rotura e a extensão na rotura.

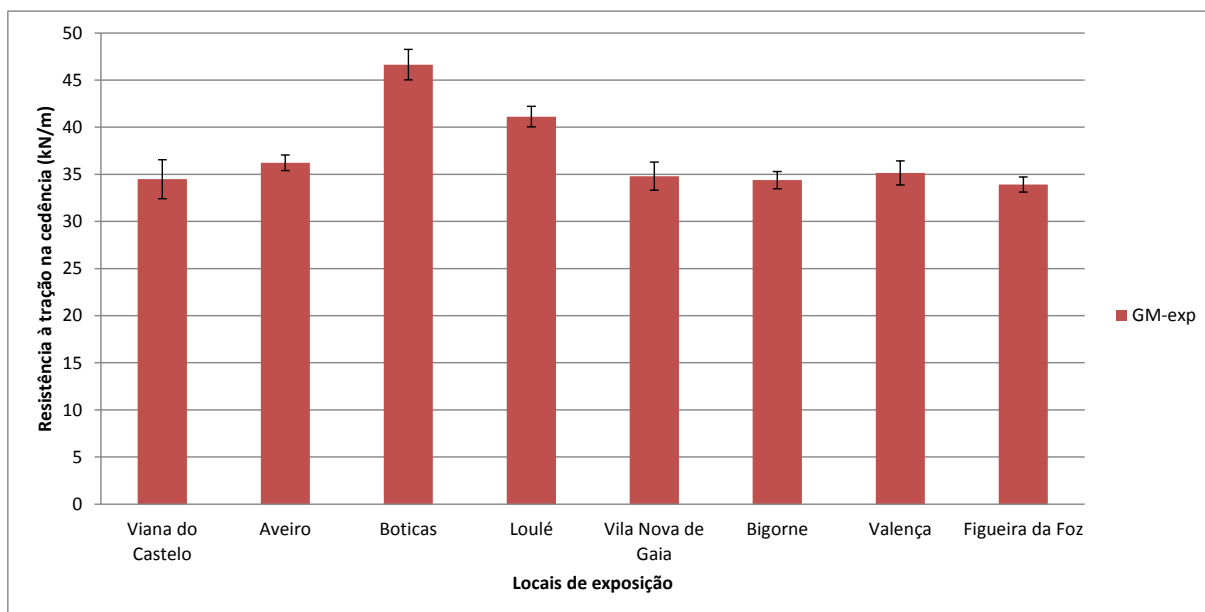


Figura 4.7 – Resistência à tração na cedência - *GM-exp*.

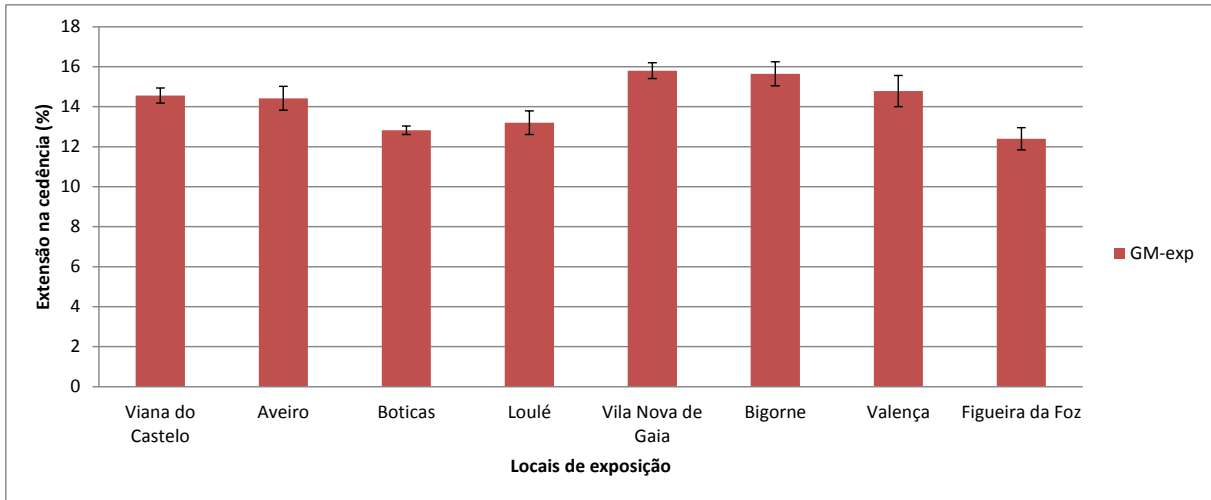


Figura 4.8 – Extensão na cedência – *GM-exp*.

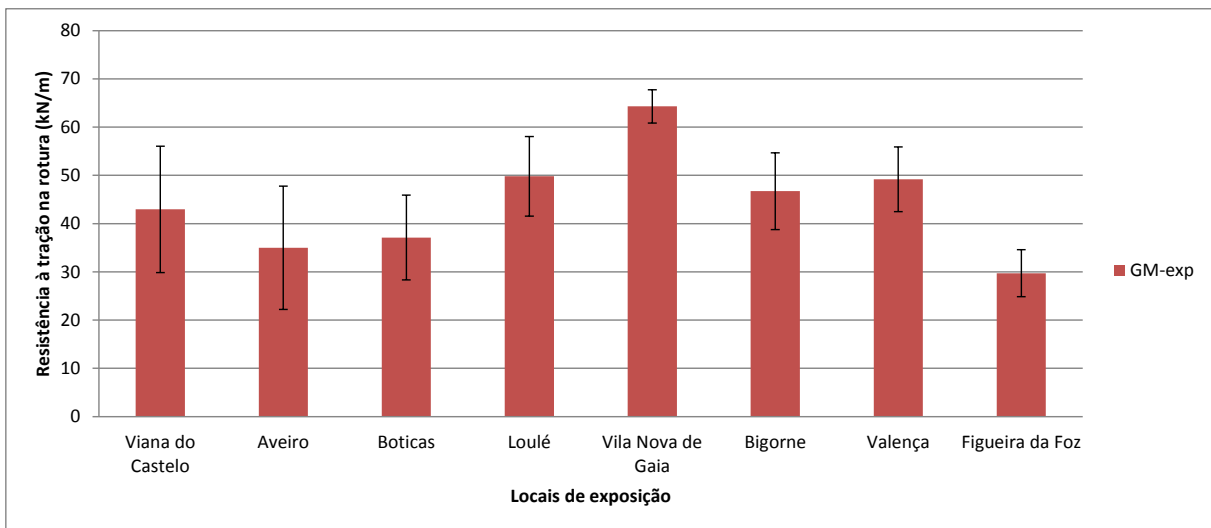


Figura 4.9 – Resistência à tração na rotura - *GM-exp*.

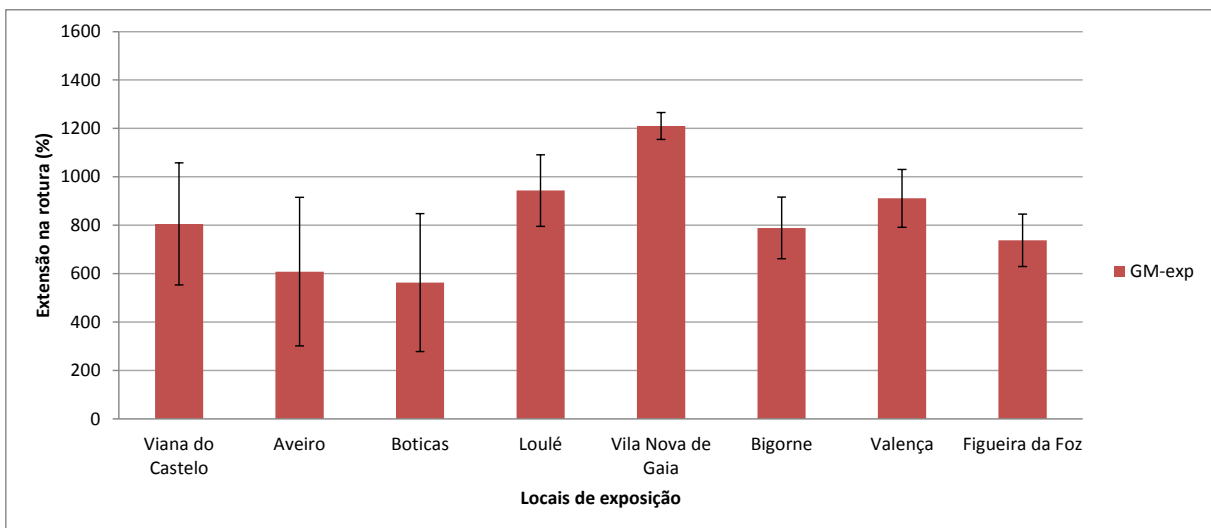


Figura 4.10 – Extensão na rotura – *GM-exp*.

À semelhança do que aconteceu para as amostras *GM-cob* e *GM-arq*, para as *GM-exp* a dispersão dos resultados, expressa pelo desvio padrão, é muito semelhante, sendo relativamente baixa para estas propriedades na cedência e elevada na rotura.

Na situação da *GM-exp*, a resistência à tração na cedência, apresentou um valor máximo de 46,6 kN/m, para a amostra de Boticas, e um valor mínimo 33,9 kN/m, para a amostra da Figueira da Foz, sendo a diferença entre estes valores de 12,7 kN/m.

Para a resistência à tração na rotura, obteve-se um valor máximo para a amostra de Vila Nova de Gaia, correspondente a 64,3 kN/m, e um valor mínimo de 29,7 kN/m, para a amostra da Figueira da Foz. A diferença entre os diferentes locais foi de 34,6 kN/m.

Para a extensão na rotura, obteve-se um valor máximo 1210,0% para a amostra de Vila Nova de Gaia, e um valor mínimo 562,8% para a amostra de Boticas, apresentando uma diferença de 647,2%.

Para todas as amostras e todos os locais, a dispersão dos resultados em termos de resistência e de extensão na rotura foi, de um modo geral, superior às variações obtidas para as amostras não expostas *versus* expostas. Considera-se que não é possível determinar se as variações obtidas são imputáveis à exposição às condições climáticas ou à heterogeneidade do material, pelo que os resultados da resistência e a extensão na rotura não serão objeto de análise no Cap.5.

4.4 Determinação do índice de fluidez

Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente do índice de fluidez, para a *GM-arq* de Viana do Castelo, *GM-cob* (expostas com cobertura de geotêxtil) de Aveiro, Boticas e Loulé e *GM-exp* (expostas sem geotêxtil) de Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne, Valença e Figueira da Foz.

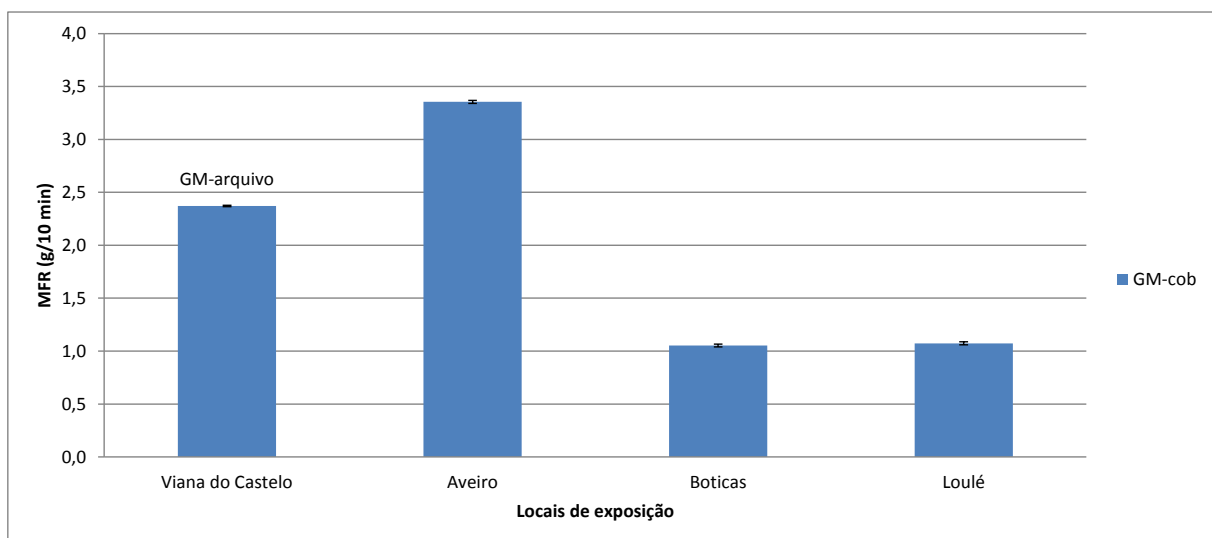


Figura 4.11 – Índice de fluidez – GM em arquivo e *GM-cob*.

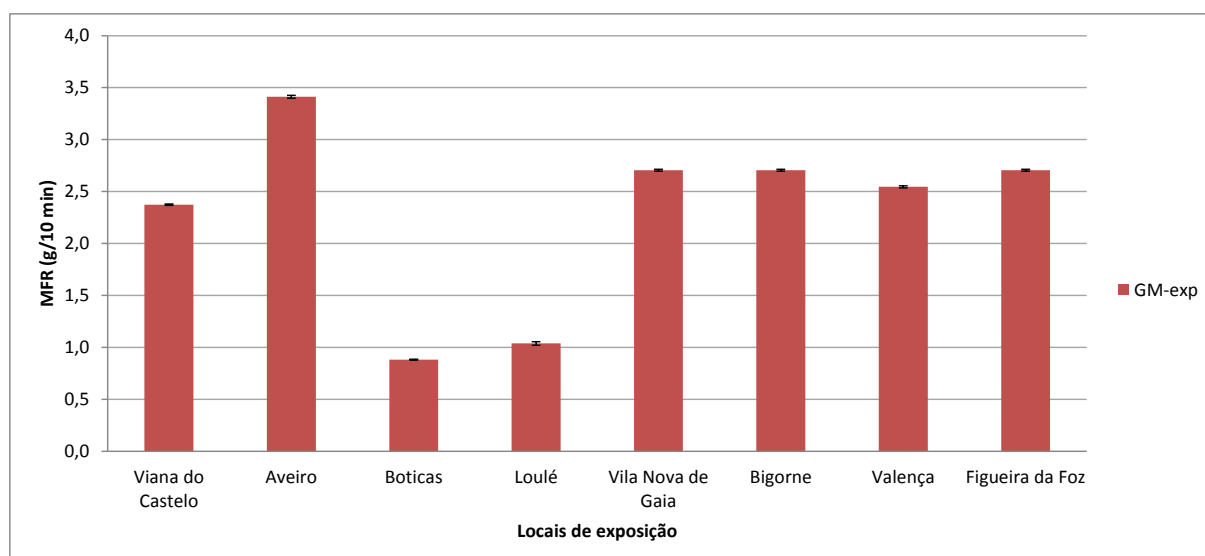


Figura 4.12 – Índice de fluidez – *GM-exp*.

Como pode observar-se nas Figura 4.11 e 4.12, a dispersão dos resultados, expressa pelo desvio padrão, foi praticamente nula, para todas as amostras - *GM-arq*, *GM-cob* e *GM-exp* - e em todos os locais de exposição.

Relativamente às amostras de *GM-cob*, observou-se que existem dois grupos de locais com valores próximos, o primeiro grupo formado pelas amostras de Viana do Castelo (*GM-arq*) e Aveiro, e o segundo pelas amostras de Boticas e Loulé (*GM-cob*). O valor máximo obtido foi de 3,4 g/10 minutos, na amostra de Aveiro, e o mínimo de 1,1 g/10 minutos, na amostra de Boticas, e a diferença foi de 2,3 g/10 minutos.

Para a *GM-exp*, observou-se que o índice de fluidez apresentou um valor máximo de 3,4 g/10 minutos, em Aveiro, e como valor mínimo 0,9 g/10 minutos para a amostra de Boticas, sendo a diferença entre estes valores de 2,5 g/10 minutos.

4.5 Teor em negro de carbono

Nas Figura 4.13 e 4.14 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente do teor em negro de carbono, para as amostras *GM-arq* (Viana do Castelo), *GM-cob* (Aveiro, Boticas e Loulé) e *GM-exp* (Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne, Valença e Figueira da Foz).

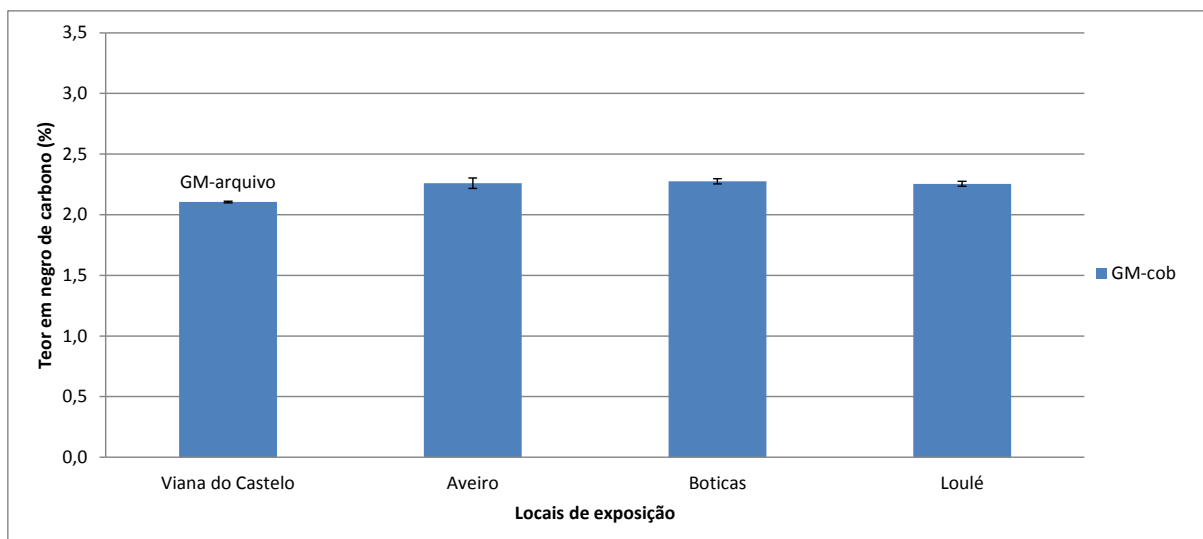


Figura 4.13 – Teor em negro de carbono – *GM-arq* em e *GM-cob*.

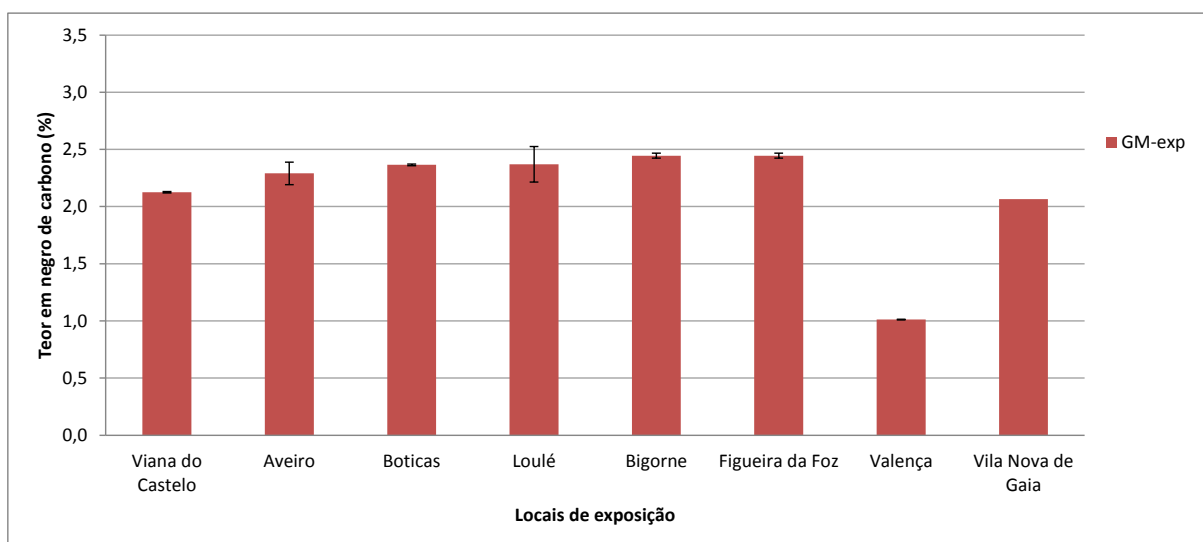


Figura 4.14 – Teor em negro de carbono – *GM-exp*.

Como pode observar-se nas Figura 4.13 e 4.14, a dispersão dos resultados, expressa pelo desvio padrão, foi praticamente nula para as *GM-arq*, *GM-cob* e *GM-exp*, no entanto, para a *GM-exp* de Aveiro e Loulé as barras correspondentes ao desvio padrão exprimem uma dispersão ligeiramente superior às restantes situações.

Para as *GM-cob* e *GM-arq*, o teor em negro de carbono apresentou valores muito semelhantes, para os vários locais de exposição, sendo o valor máximo de 2,3%, para a amostra de Boticas, e o valor mínimo de 2,1%, para as amostras de Viana do Castelo retirada para arquivo (*GM-Arq*).

Para a *GM-exp*, os resultados obtidos experimentalmente em todos os locais de exposição foram muito semelhantes, à exceção de Valença que apresentou um valor mínimo de 1,0%. O valor máximo

de 2,4% corresponde às amostras *GM-exp* de Bigorne e Figueira da Foz, sendo a diferença entre o valor máximo e mínimo de 1,4%.

4.6 Tempo de indução (OIT)

Nas Figuras 4.15 e 4.16 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente do tempo de indução à oxidação, para as amostras *GM-arq* (Viana do Castelo), *GM-cob* (Aveiro, Boticas e Loulé) e *GM-exp* (Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne, Valença e Figueira da Foz).

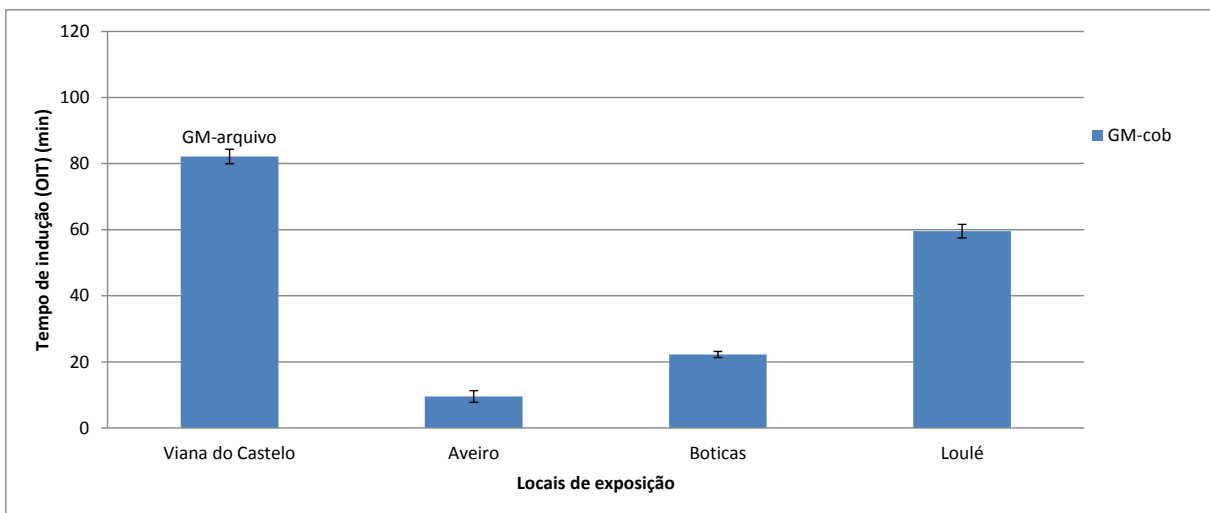


Figura 4.15 – Tempo de indução à oxidação – GM em arquivo e *GM-cob*.

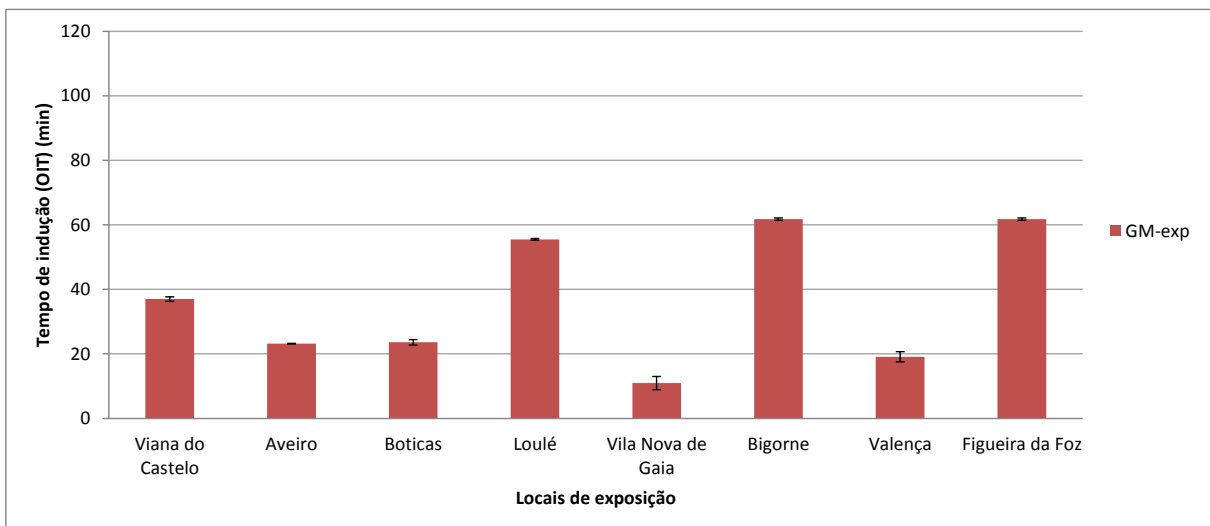


Figura 4.16 – Tempo de indução à oxidação – *GM-exp*.

Como pode verificar-se nas Figura 4.15 e 4.16, a dispersão dos resultados, expressa pelo desvio padrão, para as amostras *GM-arq*, *GM-cob* e *GM-exp* é reduzida e semelhante nos diferentes locais

de exposição. De salientar que a amostra (*GM-exp*) de Viana do Castelo, apresentou um valor bastante inferior ao da *GM-arq*.

Para a *GM-cob*, quando comparamos os resultados obtidos nos diferentes locais, verifica-se que, ocorreu alguma variabilidade. O valor máximo obtido foi de 82,2 minutos, para a *GM-arq* de Viana do Castelo, e o mínimo de 9,6 minutos, em Aveiro, sendo a diferença entre o máximo e o mínimo de 72,6 minutos.

Para a situação da *GM-exp*, ocorreu também alguma variabilidade nos resultados obtidos nos diferentes locais, como mostra a Figura 4.16. O valor máximo obtido foi de 61,8 minutos, para as amostras de Bigorne e Figueira da Foz, e o valor mínimo foi de 11,0 minutos, para a amostra de Vila Nova de Gaia, sendo a diferença entre o máximo e o mínimo de 50,8 minutos.

4.7 Considerações finais

Neste capítulo apresentaram-se os resultados obtidos experimentalmente para as diferentes propriedades em estudo (massa volúmica, resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, índice de fluidez, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação), tanto para as *GM-cob*, como para as *GM-exp*, em cada um dos locais de exposição às condições climáticas (Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne Valença e Figueira da Foz). Apresentaram-se, igualmente, os valores obtidos para a única amostra de arquivo enviada ao LNEC (Viana do Castelo). Salienta-se que em apenas três dos oito locais de exposição (Aveiro, Boticas e Loulé), foi possível avaliar as propriedades das GMs nas condições de *GM-exp* e de *GM-cob*, uma vez que, para esta última, o geotêxtil que inicialmente cobria as amostras já não existia.

Foram identificados os valores máximos e mínimos, bem como as diferenças, para cada uma das propriedades determinadas experimentalmente, para os diferentes locais e condições de exposição.

De notar que, para a resistência à tração e extensão na cedência, massa volúmica, índice de fluidez e teor em negro de carbono, não ocorreram grandes variações entre os valores obtidos para as *GM-cob* e *GM-exp*. No caso do tempo de indução à oxidação os valores obtidos experimentalmente apresentaram variações significativas entre os vários locais de exposição, no caso específico da geomembrana em arquivo, originária de Viana do Castelo, o valor obtido foi bastante elevado relativamente ao valor obtido para as *GMs-cob*.

Para a resistência à tração e extensão na rotura ocorreu uma grande dispersão de valores para cada uma das amostras e também para cada local de exposição, tendo-se mantido esta situação tanto para as geomembranas cobertas como para as expostas, nos casos em que é possível comparar as duas situações. Face a estes resultados, considera-se que não é possível determinar se as variações destas propriedades são imputáveis à exposição das amostras às condições climáticas ou à heterogeneidade do material. Assim, a resistência à tração e a extensão na rotura não serão incluídas na análise dos resultados a realizar no Cap. 5.

Em anexo, apresentam-se os quadros resumo dos valores médios obtidos experimentalmente, para as diferentes propriedades.

5 | Análise de resultados

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, em primeiro lugar, indicam-se os valores das diferentes propriedades a adotar como referência no estudo da evolução das propriedades das GMs expostas às condições climáticas durante aproximadamente 12 anos, cobertas ou não com geotêxtil.

Em segundo lugar, analisa-se a influência da exposição às condições climáticas sobre as diferentes geomembranas, mediante a comparação dos resultados obtidos com os valores de referência.

Em terceiro lugar, avalia-se o efeito da proteção do geotêxtil sobre as geomembranas, comparando os valores obtidos para GMs expostas com e sem cobertura.

Em quarto lugar, discute-se a influência da radiação UV sobre as propriedades das geomembranas fabricadas pelo mesmo fabricante, expostas em locais com diferentes condições climáticas. A análise é realizada através da comparação entre os resultados obtidos para a mesma geomembrana exposta em locais com diferentes índices médios de UV.

Por fim, comparam-se os valores das diferentes propriedades para as GM-exp com os valores preconizados pelo GRI (GM13), para verificar se as GMs expostas ainda cumprem os requisitos mínimos presentemente preconizados por este Instituto.

5.2 Valores de referência

Uma vez que não se dispõe das amostras de arquivo de todos os locais (ver secção 3.1), para averiguar quais os valores mais adequados para servir de referência no estudo da evolução das propriedades das GMs expostas, analisam-se os resultados iniciais disponíveis, nomeadamente, os seguintes: (i) obtidos pelo fabricante no âmbito do seu controlo de fabrico, para os lotes a partir dos quais as GMs usadas neste trabalho foram fabricadas; (ii) determinados laboratorialmente pelo LNEC, quando possível; e (iii) indicados nas fichas técnicas das geomembranas. Nesta análise usaram-se apenas as propriedades resistência à tração/extensão e índice de fluidez por serem as únicas de que se dispõe simultaneamente destes resultados (Quadro 5.1).

Salienta-se que a comparação das propriedades só tem significado se as geomembranas forem provenientes do mesmo fabricante (fabricadas com o mesmo polímero), como referido por Koerner (1998), pelo que a análise efetuada se reporta apenas às GM-A e GM-B.

Quadro 5.1 – Resultados dos ensaios de controlo de fabrico, realizados no LNEC e valores indicados nas fichas técnicas.

Propriedade	GM-A		GM-B			
	Fabricante	Ficha Técnica	Fabricante	LNEC	Ficha Técnica	
Tração ASTM D638	Cedência (kN/m)	31,90 (2,92)	34,0	40,52	37,06 (0,25)	30,0
Extensão ASTM D638	Cedência (%)	13,20 (2,15)	10,0	10,38	11,66 (0,43)	10,0
Índice de fluidez (g/10 min) ASTM D1238		0,96	2,4	0,82		0,6-1,8

Notas:

GM-A exposta em Valença, Vila Nova de Gaia e Aveiro

GM-B exposta em Figueira da Foz e Loulé

(xxx) correspondente ao desvio padrão

Relativamente à comparação entre os resultados obtidos pelo fabricante e pelo LNEC (GM-B), verifica-se que os valores obtidos pelo LNEC são ligeiramente inferiores para a tração na cedência, e ligeiramente maiores para a extensão na cedência. Os valores obtidos nos ensaios iniciais são ligeiramente superiores aos da ficha técnica para todas as propriedades

Por se dispor de maior número de resultados obtidos pelo fabricante, optou-se por usar estes como valores de referência.

Para a GM-A, verifica-se que a resistência à tração na cedência obtida pelo fabricante é semelhante à indicada na ficha técnica. Os valores obtidos pelo fabricante para a extensão na cedência são superiores aos valores indicados na ficha técnica.

Para o índice de fluidez para a GM-A, o valor inicial obtido pelo fabricante é de 0,96 g/10min, bastante inferior ao valor médio indicado na ficha técnica, que é 2,4 g/10min. No caso da GM-B, o valor obtido pelo fabricante é de 0,82 g/10min e encontra-se dentro da gama de valores da ficha técnica, que indica um intervalo de 0,6 a 1,8 g/10min. Face a estes resultados, nas análises seguintes optou-se por usar os valores obtidos pelo fabricante.

Em suma, nas seções seguintes serão adotados como referência os valores obtidos pelo fabricante no âmbito do seu controlo de fabrico, quando existentes (ver Quadro 3.1). Na ausência de valores obtidos pelo fabricante serão usados os valores indicados nas respetivas fichas técnicas. Quando os resultados de referência são os obtidos pelo fabricante, nos gráficos seguintes, são identificados como *GM-F(i)*. No caso de os valores de referência corresponderem aos valores das fichas técnicas são designados como F. Técnica.

5.3 Influência da exposição às condições climática sobre as diferentes geomembranas

Nas Figura 5.1 a 5.6 comparam-se os resultados obtidos para as diferentes geomembranas expostas sem geotêxtil, com os valores de referência, para as propriedades: massa volúmica, índice de fluidez, resistência à tração na cedência, extensão na cedência, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação. As amostras foram expostas nos seguintes locais: Valença, Vila Nova de Gaia, Aveiro, Figueira da Foz, Loulé, Boticas, Bigorne e Viana do Castelo.

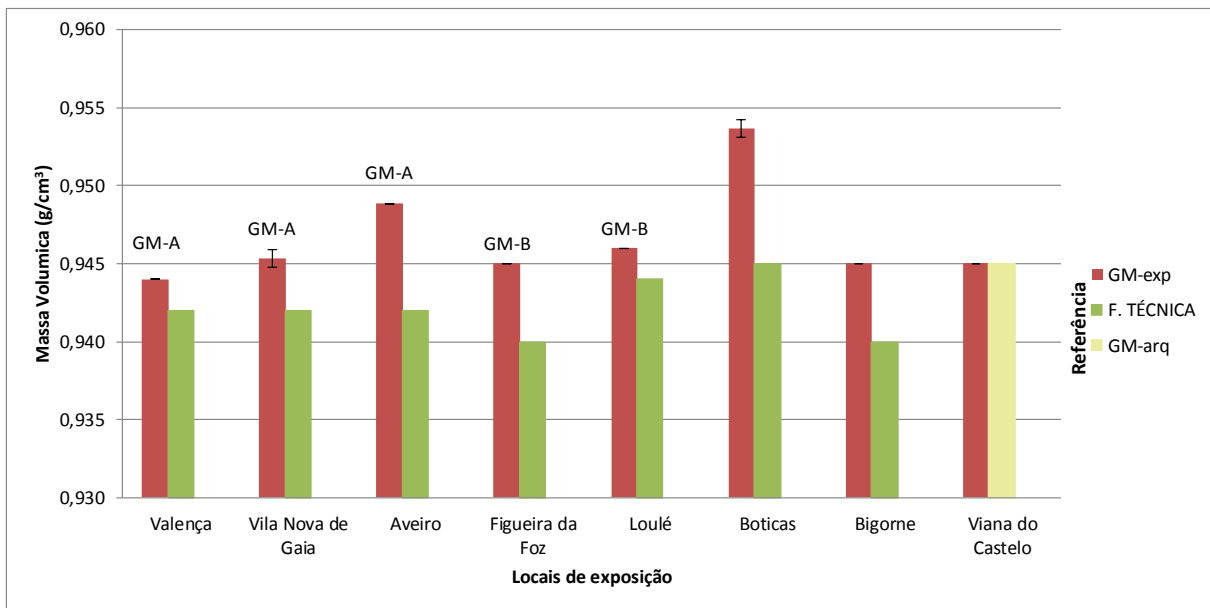


Figura 5.1 – Comparação da massa volúmica da *GM-exp* com os valores de referência.

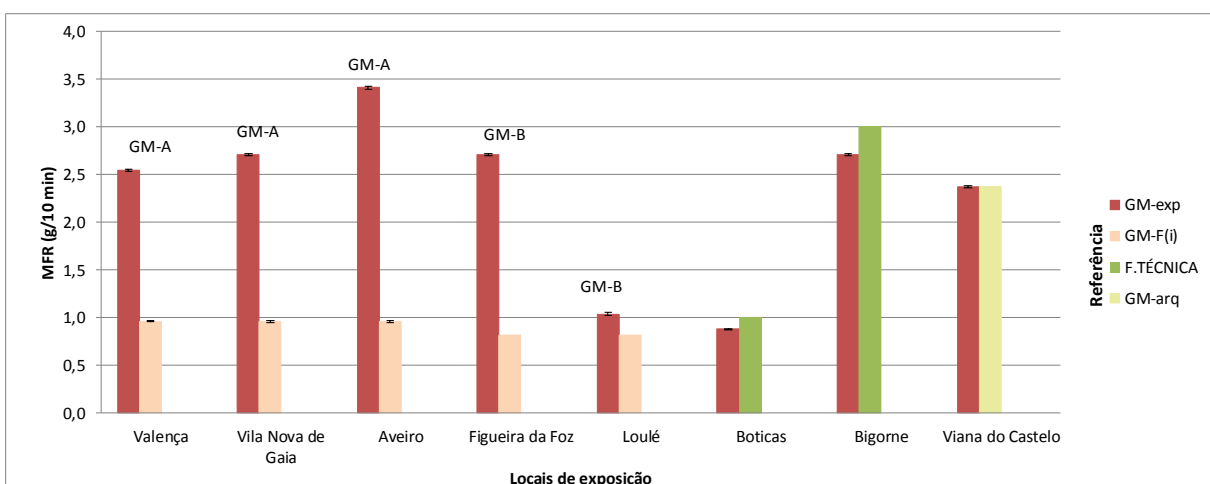


Figura 5.2 – Comparação do índice de fluidez da *GM-exp* com os valores de referência.

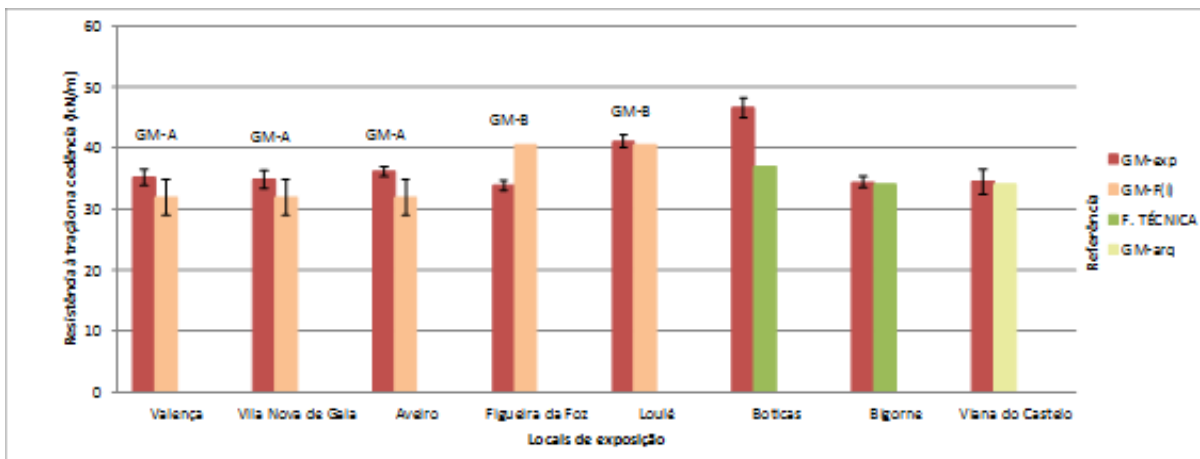


Figura 5.3 – Comparação da resistência à tração na cedência da *GM-exp* com os valores de referência.

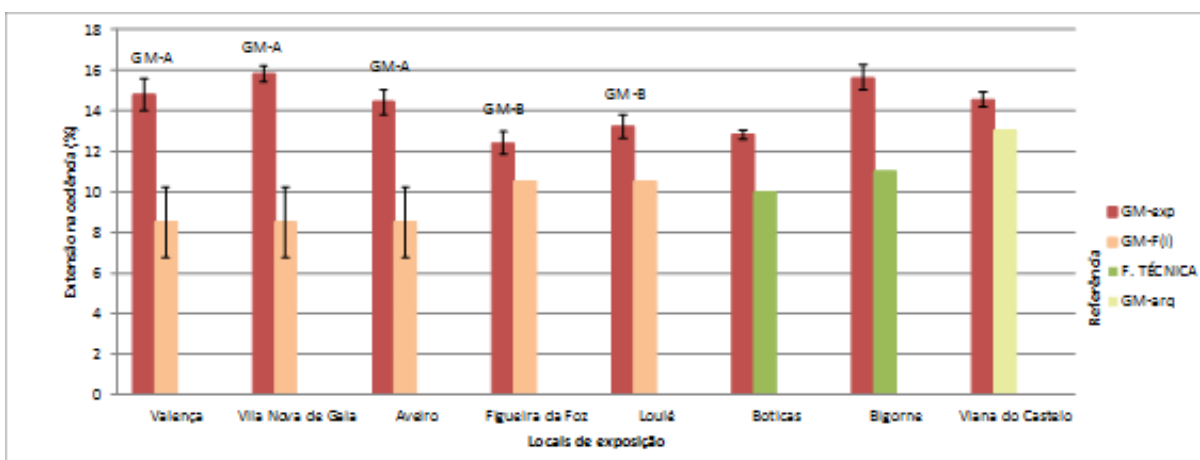


Figura 5.4 – Comparação da extensão na cedência da *GM-exp* com os valores de referência.

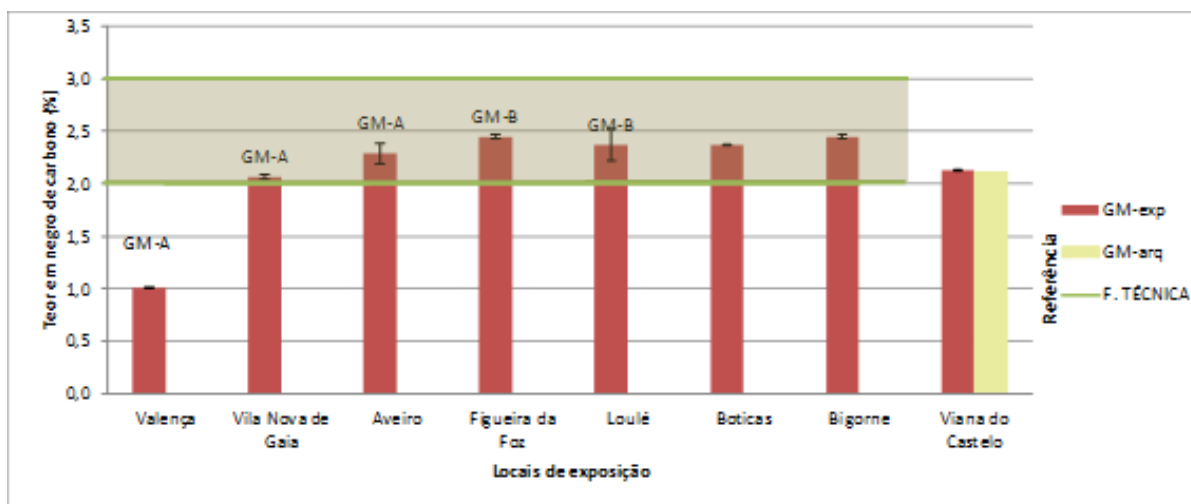


Figura 5.5 – Comparação do teor em negro de carbono da *GM-exp* com os valores de referência.

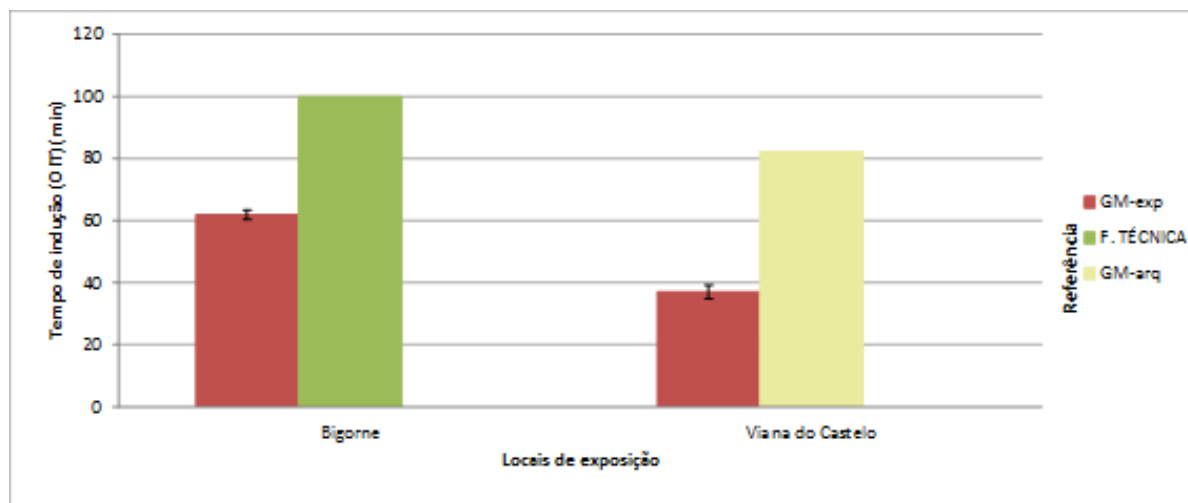


Figura 5.6 – Comparação do tempo de indução à oxidação da *GM-exp* com os valores de referência.

Como pode verificar-se na Figura 5.1 todas as amostras expostas apresentam valores de massa volúmica superiores aos valores de referência, à exceção da *GM-exp* em Viana do Castelo, que apresentou praticamente o mesmo valor que o obtido para a amostra de referência.

O aumento da massa volúmica deve ser encarado com reservas dado que os valores que se dispõe para referência são valores médios e, por isso, as geomembranas em análise podem ter valores iniciais superiores aos indicados nas fichas técnicas. O aumento da massa volúmica pode ser relacionado com um aumento de zonas amorfas da geomembrana em consequência da exposição às condições climáticas. Resultados semelhantes foram obtidos por Rowe *et al.* (2003), conforme referido na seção 2.6. Estes autores relacionaram o aumento desta propriedade com o aumento da cristalinidade em consistência com o referido por Halse *et al.* (1991).

Para o índice de fluidez (Figura 5.2) verifica-se que, praticamente, todos os valores obtidos para as geomembranas expostas sem geotêxtil nos diferentes locais são superiores aos valores de referência para as *GM-exp*, sugerindo que esta propriedade foi influenciada pela exposição às condições climáticas. Em Boticas e Bigorne os valores obtidos são inferiores observa-se uma tendência contrária, o que pode ser explicado pelo facto dos valores de referência serem valores médios, pois são provenientes da ficha técnica, no caso de Viana do Castelo os valores obtido para a *GM-exp* foram semelhantes aos da amostra em arquivo.

Estes resultados são consistentes com os obtidos por Lodi (2003) Rowe *et al.* (2003). Segundo estes autores, o aumento do índice de fluidez pode ser explicado pela degradação das geomembranas devido ao efeito dos raios UV.

No que se refere à resistência à tração e extensão na cedência (Figura 5.3 e Figura 5.4) os valores obtidos experimentalmente para as geomembranas expostas sem geotêxtil, foram superiores aos valores de referência, com exceção da *GM* exposta na Figueira da Foz, onde os valores iniciais da resistência à tração são superiores aos valores obtidos após 12 anos de exposição.

Estes resultados contrariam a tendência verificada nos estudos realizados por Rowe *et al.* (2003), e Tarnowski & Baldauf (2012) e Rowe & Ewais (2014). A diferença entre os resultados obtidos no presente trabalho e os relatados na bibliografia pode ser relacionada a um possível aumento da cristalinidade da geomembrana na fase inicial de degradação que pode estar associado a um aumento da resistência à tração, tal como indicado por Rowe *et al.* (2003). De acordo com estes autores, o aumento cristalinidade numa fase inicial de degradação, está relacionado com despoletar do processo de oxidação da geomembrana. Contudo, à medida que a oxidação prossegue, a degradação acentua-se e os valores destas propriedades tendem a diminuir.

Para o teor em negro de carbono (Figura 5.5) verifica-se que os valores de referência correspondem a um intervalo compreendido entre 2 e 3 %, o que torna a comparação inconclusiva, por não se dispor apenas de um valor. De referir que, à exceção da geomembrana exposta em Valença, todos os resultados estão compreendidos nesse intervalo, e que a *GM-exp* em Viana do Castelo apresenta um valor semelhante ao obtido para a *GM-arq*.

Para o tempo de indução à oxidação (Figura 5.6) só se dispõe de valores de referência para dois locais de exposição. Os resultados obtidos para a geomembrana exposta foram bastante inferiores aos 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 indicam que as geomembranas em causa se encontram na Fase A de degradação (depleção de antioxidantes), referida por Hsuan e Koerner (1998) e Greenwood *et al.* (2012).

Estes resultados estão de acordo com Rowe *et al.* (2003), Lodi *et al.* (2007), Tarnowski & Baldauf (2012), Rowe & Ewais (2014), que relataram grandes decréscimos nos valores de OIT em consequência da exposição.

Em suma, verificou-se que, independentemente da origem (fabricante) das diferentes geomembranas, a massa volúmica, o índice de fluidez, a resistência à tração e extensão na cedência e o tempo de indução à oxidação foram influenciados pela exposição às condições climáticas. Os resultados obtidos indicam que poderá ter ocorrido a formação de produtos da reação de oxidação que conduzem ou um possível aumento de cristalinidade das geomembranas expostas, revelada pelo aumento da massa volúmica, e um consumo de antioxidantes, expressa pela diminuição do tempo de indução à oxidação. Para a resistência à tração na cedência, o aumento verificado para as geomembranas expostas poderá estar relacionado com um aumento de cristalinidade, sugerido pelo aumento da massa volumica.

O índice de fluidez nas geomembranas expostas aumentou, sugerindo que ocorreu uma diminuição da massa molecular das mesmas. Os resultados do teor em negro de carbono foram inconclusivos.

O facto de ainda subsistirem antioxidantes nas geomembranas expostas sugere que estas se encontram na Fase A de degradação, designada por depleção de antioxidantes.

5.4 Influência do geotêxtil de cobertura

Nas Figuras 5.7 a 5.12 apresentam-se as comparações efetuadas para a massa volúmica, índice de fluidez, resistência à tração na cedência, extensão na cedência, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação, para as geomembranas expostas com e sem geotêxtil. Recorda-se que apenas existiam geomembranas expostas com e sem geotêxtil para os seguintes locais: Aveiro, Boticas e Loulé.

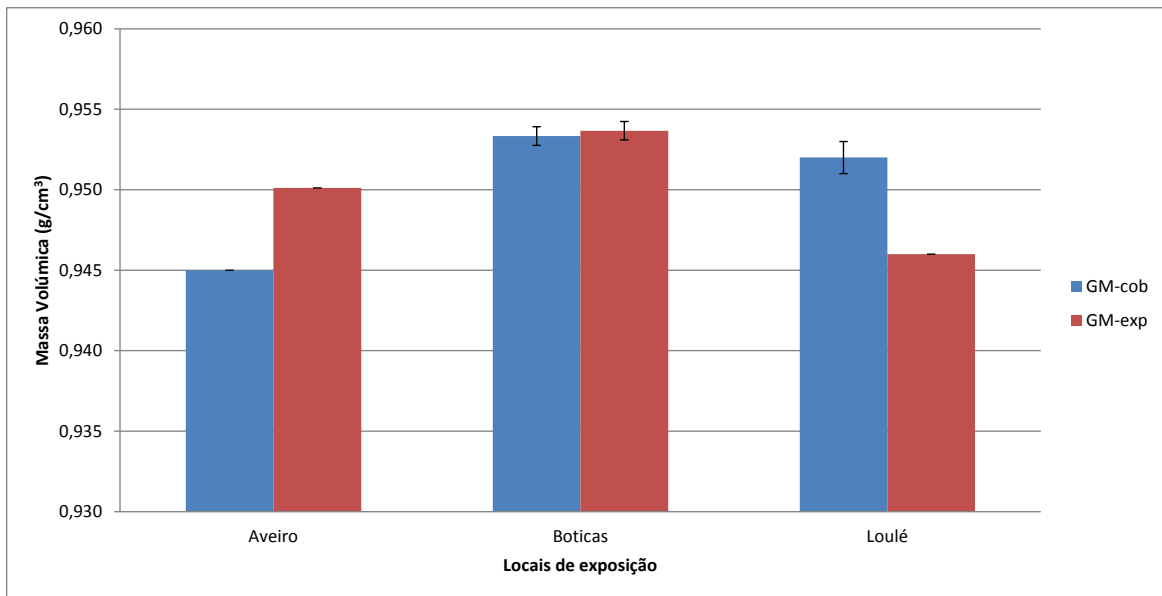


Figura 5.7 – Comparação da massa volúmica entre *GM-cob* e a *GM-exp* nos vários locais de exposição.

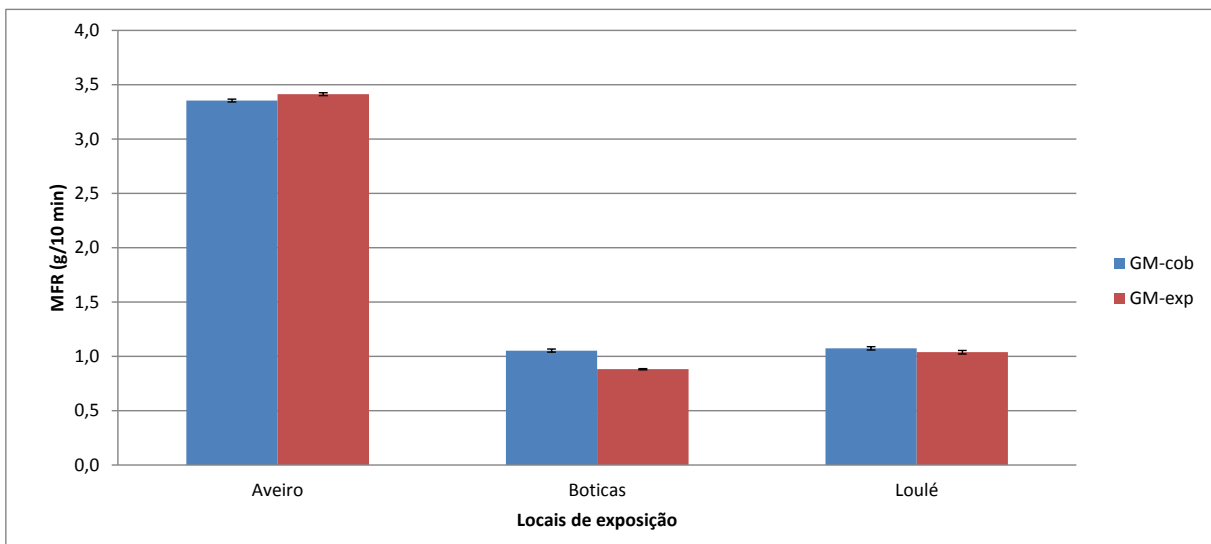


Figura 5.8 – Comparação do índice de fluidez entre *GM-cob* e da *GM-exp* nos vários locais.

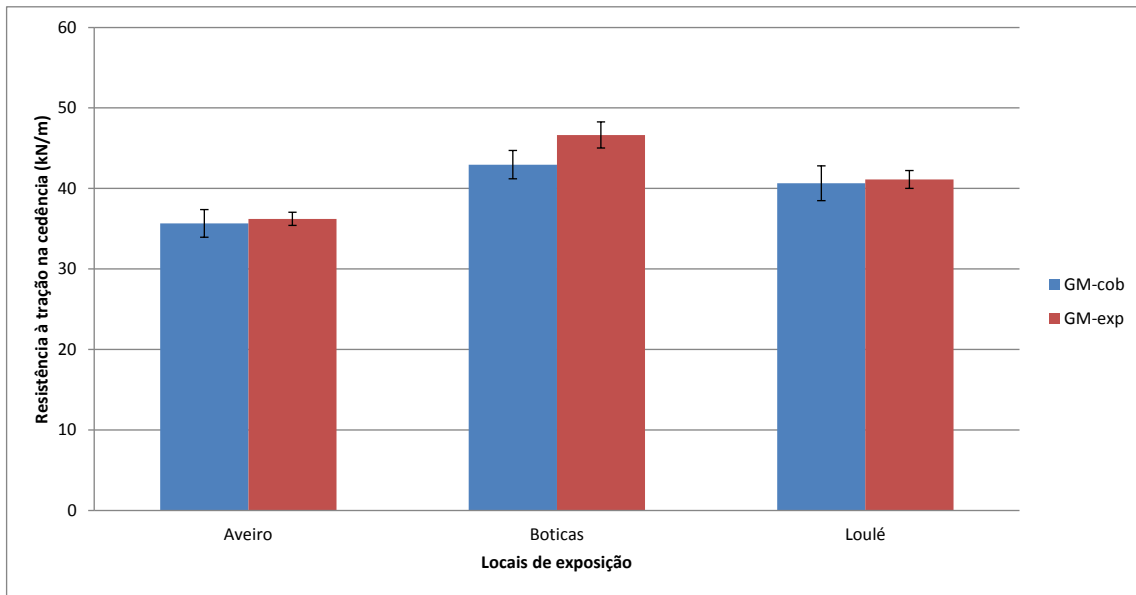


Figura 5.9 – Comparação da resistência à tração na cedência entre *GM-cob* e a *GM-exp* nos vários locais.

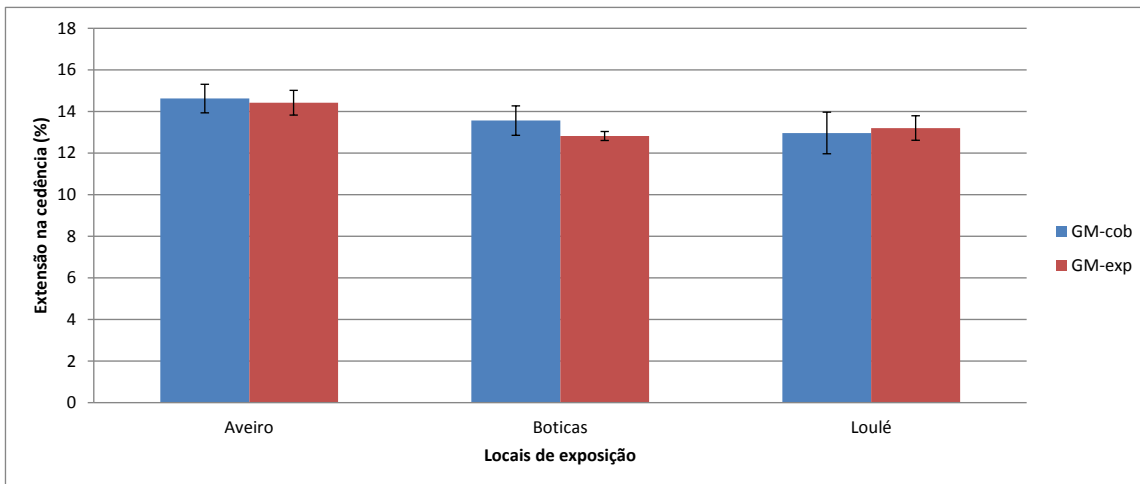


Figura 5.10 – Comparação da extensão na cedência entre *GM-cob* e a *GM-exp* nos vários locais.

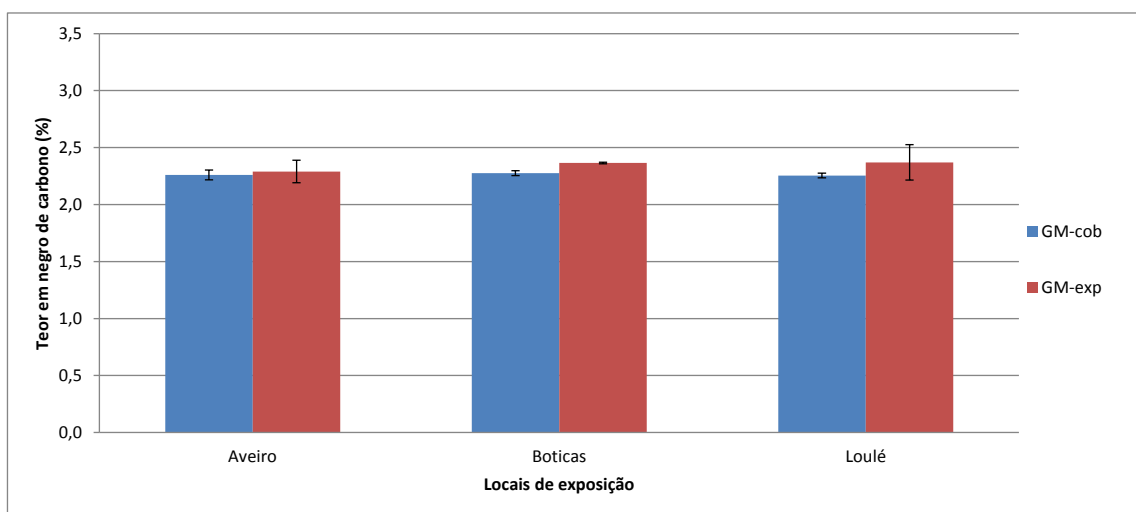


Figura 5.11 – Comparação do teor em negro de carbono entre *GM-cob* e a *GM-exp* nos vários locais.

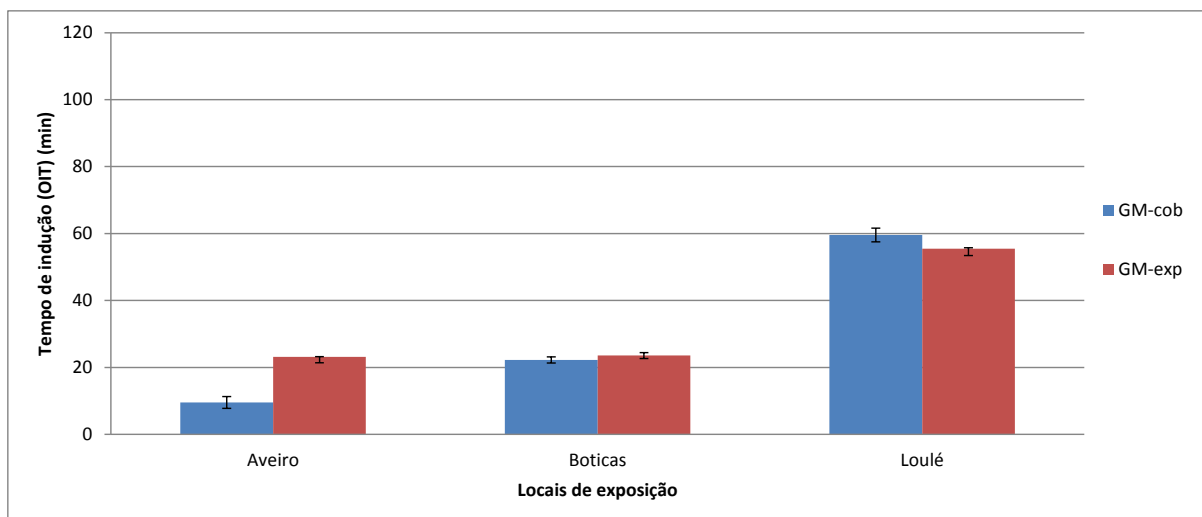


Figura 5.12 – Comparação do tempo de indução à oxidação (OIT) entre *GM-cob* e a *GM-exp* nos vários locais.

Para a massa volúmica (Figura 5.7), verificou-se que os valores obtidos experimentalmente foram menores para a *GM-cob* do que para a *GM-exp*, para as amostras expostas em Aveiro e Boticas, sugerindo que, nestes locais, a proteção do geotêxtil foi eficaz. Para Loulé, a geomembrana coberta com geotêxtil apresentou uma massa volúmica superior à geomembrana exposta sem geotêxtil, contrariamente ao esperado. Este resultado pode ser explicado pela degradação do geotêxtil, que deixou de cumprir a função de proteção. Não é, porém, clara a razão pela qual as duas amostras expostas apresentam valores diferentes para esta propriedade.

Para o índice de fluidez (Figura 5.8), resistência à tração e extensão na cedência (Figura 5.9 e Figura 5.10), e teor em negro de carbono (Figura 5.11) 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 heterogeneidade associada aos materiais, expressa pelo desvio padrão das amostras. Estes resultados indicam que o geotêxtil não proporcionou uma proteção adicional às geomembranas.

Para o tempo de indução à oxidação (Figura 5.12), verificou-se que os valores para a *GM-cob* foram inferiores aos obtidos para *GM-exp* em Aveiro, contrariamente ao expectável. Não é, porém, claro o motivo pelo qual a amostra coberta com geotêxtil apresenta um menor valor para esta propriedade.

Em Boticas e Loulé, os resultados foram semelhantes, tendo em consideração a heterogeneidade das geomembranas, expressa pelo desvio padrão. Estes resultados sugerem que geotêxtil poderá ter sofrido degradação e, por isso, não contribuiu eficazmente na proteção da geomembrana.

Em suma, para a massa volúmica e para tempo de indução à oxidação as diferenças ocorridas entre a *GM-cob* e *GM-exp* nos diferentes locais foram em sentidos opostos, não sendo evidente a causa de tal comportamento. Para o índice de fluidez, a resistência à tração, a extensão na cedência e o teor em negro de carbono, os resultados obtidos sugerem que o geotêxtil não foi eficaz na tarefa de proteção da geomembrana aos efeitos da exposição às condições climáticas. A degradação do geotêxtil poderá ser a razão para o sucedido.

Face ao exposto, no estudo da influência do índice UV sobre GMs expostas em diferentes locais, apresentado na secção seguinte, serão apenas comparados os resultados da geomembranas A e B

5.5 Influência do índice UV sobre GMs expostas em diferentes locais

Nas Figura 5.13 a 5.18 apresentam-se os valores obtidos experimentalmente para as geomembranas expostas, produzidas pelo mesmo fabricante e expostas em locais com diferentes índices UV, para as propriedades massa volúmica, resistência à tração na cedência, extensão na cedência, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação. Recorda-se que nestas condições se encontram duas geomembranas, GM-A e GM-B, expostas respetivamente, em Valença, Vila Nova de Gaia e Aveiro e expostas na Figueira da Foz e em Loulé.

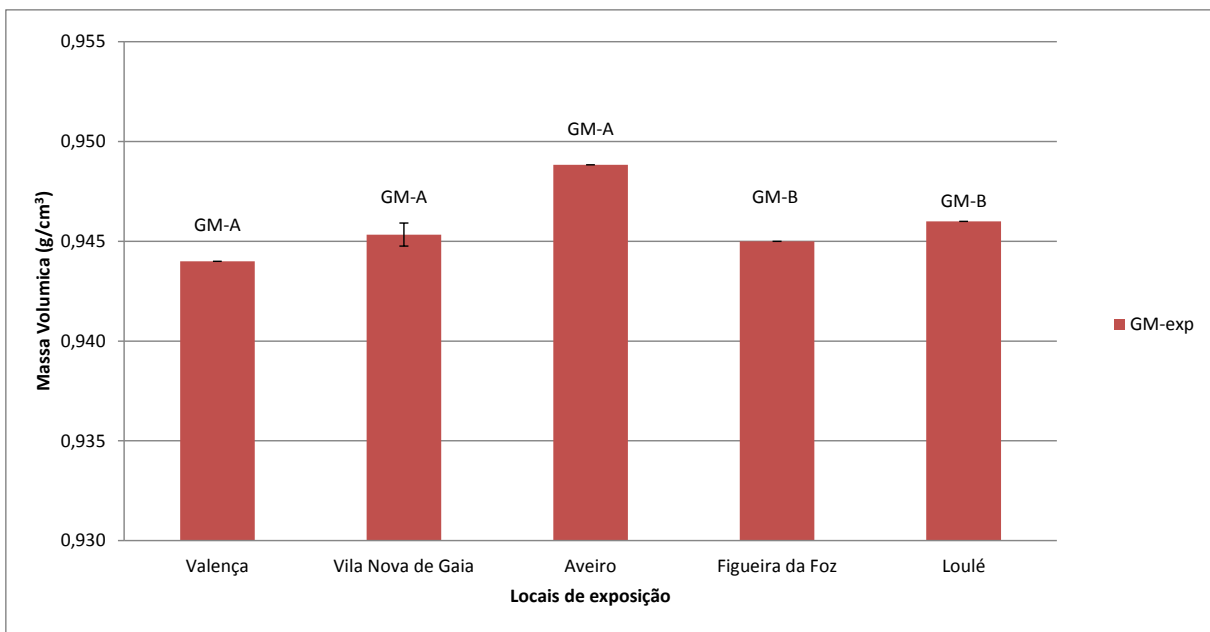


Figura 5.13 – Comparação da massa volúmica das GM-A e GM-B nas condições de *GM-exp* nos diferentes locais de exposição.

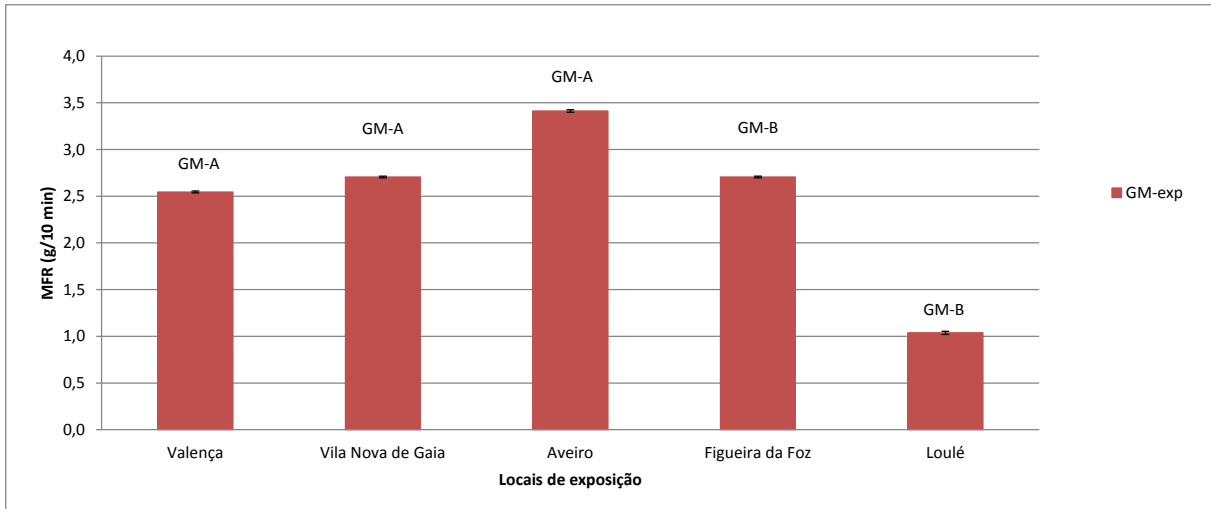


Figura 5.14 – Comparação do índice de fluidez das GM-A e GM-B nas condições de *GM-exp* nos diferentes locais de exposição.

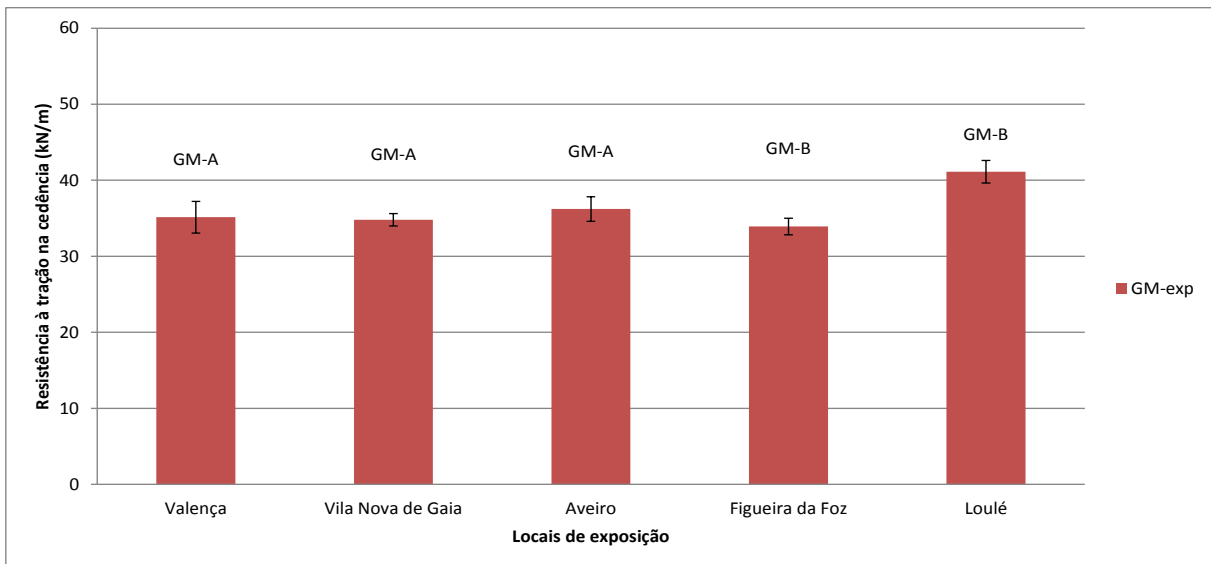


Figura 5.15 – Comparação da resistência à tração na cedência das GM-A e GM-B nas condições de *GM-exp* nos diferentes locais de exposição.

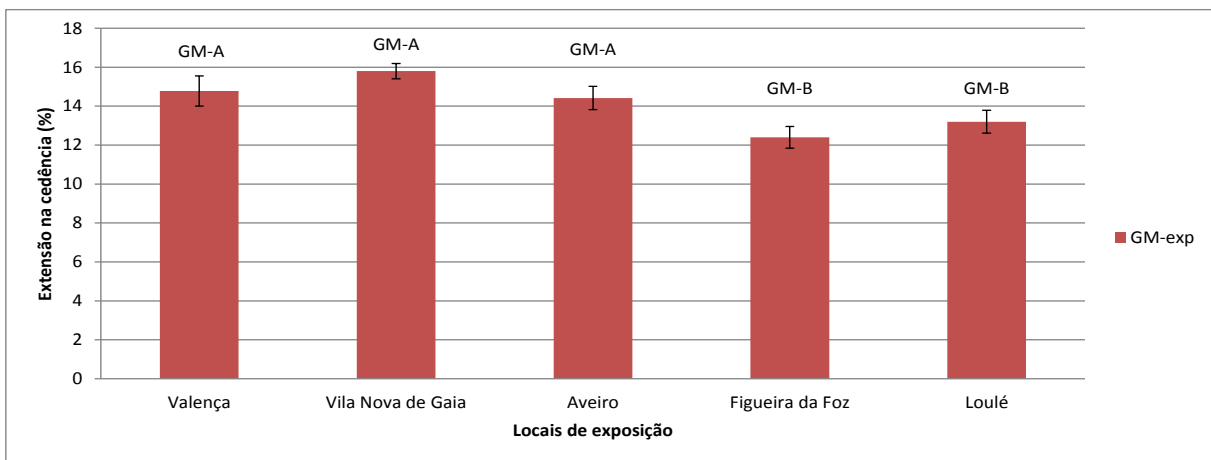


Figura 5.16 – Comparação da extensão na cedência das GM-A e GM-B nas condições de *GM-exp* nos diferentes locais de exposição.

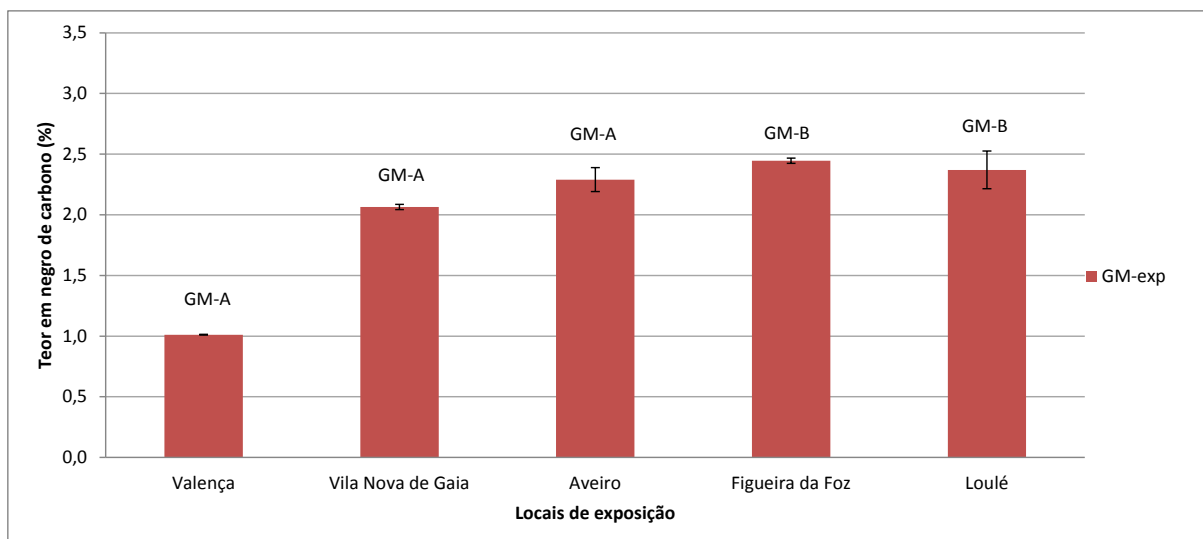


Figura 5.17 – Comparação do teor em negro de carbono das GM-A e GM-B nas condições de GM-exp nos diferentes locais de exposição.

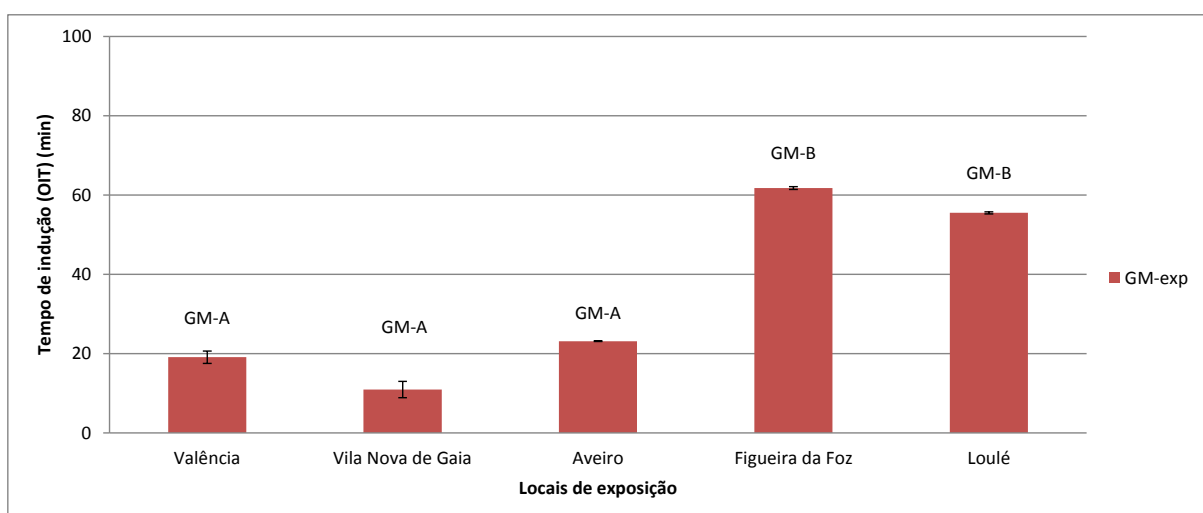


Figura 5.18 – Comparação do tempo de indução à oxidação das GM-A e GM-B nas condições de GM-exp nos diferentes locais de exposição.

Verifica-se que, a massa volúmica (Figura 5.13), para as geomembranas A e B expostas sem geotêxtil, foi aumentando à medida que a localização das amostras foi de norte para sul. No caso da GM-B, o aumento da massa volúmica pode estar relacionado com o aumento do IUV, já que o IUV médio é superior ao IUV médio na Figueira da Foz que está compreendido entre 5 e 5,5 e em Loulé está compreendido entre 5,5 e 6. Esta hipótese não é, porém, aplicável à GM-A uma vez que o IUV médio é igual em Valença, Vila Nova de Gaia e Aveiro, estando compreendido entre 4,5 e 5 IUV, como se pode observar-se na Figura 2.28, que mostra a distribuição do valor médio do índice UV_{CL} em Portugal, para o período de 2003-2012 (Nunes et al., 2013).

O aumento da massa volúmica das amostras expostas pode também estar relacionado com o eventual aumento da cristalinidade das amostras em consequência da exposição às condições

climáticas, tal como anteriormente referido. Esta hipótese é consistente com os resultados do trabalho desenvolvido por Halse *et al.* (1991).

No caso do índice de fluidez (Figura 5.14), para a GM-A verifica-se um aumento desta propriedade à medida que a localização das amostras foi de norte para sul, enquanto para a GM-B o comportamento é o oposto. Estes resultados sugerem que, no caso da GM-A o aumento do índice de fluidez não pode ser atribuído ao aumento do IUV, já este é o mesmo para os três locais. Para a GM-B a diminuição do índice de fluidez poderá estar relacionado com o IUV pois IUV médio na Figueira da Foz é inferior (5 e 5,5) ao de Loulé (5,5 e 6). A inexistência de uma tendência única para as duas geomembranas torna os resultados inconclusivos para esta propriedade.

Para a resistência à tração na cedência (Figura 5.15) e extensão na cedência (Figura 5.16), os valores obtidos experimentalmente para a GM-A, são semelhantes, o que era expectável uma vez que as amostras estão sujeitas ao mesmo IUV. No caso da GM-B notou-se um ligeiro aumento destas propriedades entre as amostras localizadas em Figueira da Foz e em Loulé, sugerindo que o aumento do IUV poderá ter influenciado esta propriedade. Tal como anteriormente mencionado, o aumento da resistência à tração e extensão na cedência pode ser devida ao aumento da cristalinidade do polímero numa fase inicial de degradação, conforme indicado por Rowe *et al.* (2003).

Verifica-se que o teor em negro de carbono (Figura 5.17), para as amostras da GM-A expostas aumentou à medida que a localização das amostras foi de norte para sul, não podendo este aumento, ser atribuído à influência do IUV, pois este índice é o mesmo nos três locais de exposição. No caso da GM-B os valores são semelhantes nos dois locais, sugerindo que não existe nenhuma relação o teor em negro de carbono e o IUV. Estes resultados, por serem contraditórios, tornam-se inconclusivos para esta propriedade.

Para o tempo de indução à oxidação (Figura 5.18), para a GM-A, verifica-se que os valores obtidos para Valença e Aveiro são semelhantes como era esperado visto que o IUV é semelhante nos dois locais. Para Vila Nova de Gaia, embora o IUV seja igual, obteve-se um valor inferior, contudo, como não se conhece o valor inicial desta propriedade, poderá estar relacionado com essa situação. Para a GM-B, os resultados foram inferiores para a amostra localizada mais a sul, podendo este facto estar relacionado com um maior consumo de antioxidantes, em consequência desta amostra se encontrar numa zona caracterizada por um maior IUV.

Em suma, a análise dos valores obtidos para as propriedades, índice de fluidez para o teor em negro de carbono a análise dos resultados foi inconclusiva. A análise de resultados para a massa volúmica, a resistência à tração e extensão na cedência e para o tempo de indução à oxidação sugere que ocorreu alguma degradação em consequência da exposição às condições climáticas. No caso da massa volúmica, o aumento da massa volúmica da GM-B, poderá estar relacionado com o aumento do IUV de norte para sul, para a GM-A, essa situação não se pode aplicar, uma vez que o IUV médio é igual nos três locais de exposição. Para a resistência à tração e extensão na cedência, para a GM-A, os valores foram semelhantes o que sugeriu que não ocorreu influência do IUV, o que era expectável uma vez que as amostras estão sujeitas ao mesmo IUV, para a GM-B verificou-se um ligeiro aumento destas propriedades sugerindo que o aumento do IUV de norte para sul poderá ter

influenciado esta propriedade. E por último para o tempo de indução à oxidação, para a GM-A os resultados obtidos sugeriram que estas geomembranas não se degradaram pela exposição às condições climáticas, de acordo com o esperado. No caso da GM-B a análise dos resultados sugeriu ter ocorrido maior consumo de antioxidantes na amostra exposta mais a sul em consequência desta se encontrar numa zona caracterizada por um maior IUV.

5.6 GM exposta versus critérios do GRI

Nas Figura 5.19 a 5.23 comparam-se os resultados obtidos para as amostras expostas sem geotêxtil (*GM-exp*) com os requisitos mínimos preconizados pelo GRI (GM13) com a finalidade de avaliar o seu desempenho e verificar se após 12 anos de exposição, as geomembranas ainda cumprem esses requisitos, para as propriedades massa volúmica, resistência à tração na cedência, extensão na cedência, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação, em Valença, Vila Nova de Gaia, Aveiro, Figueira de Foz, Loulé, Boticas, Bigorne e Viana do Castelo.

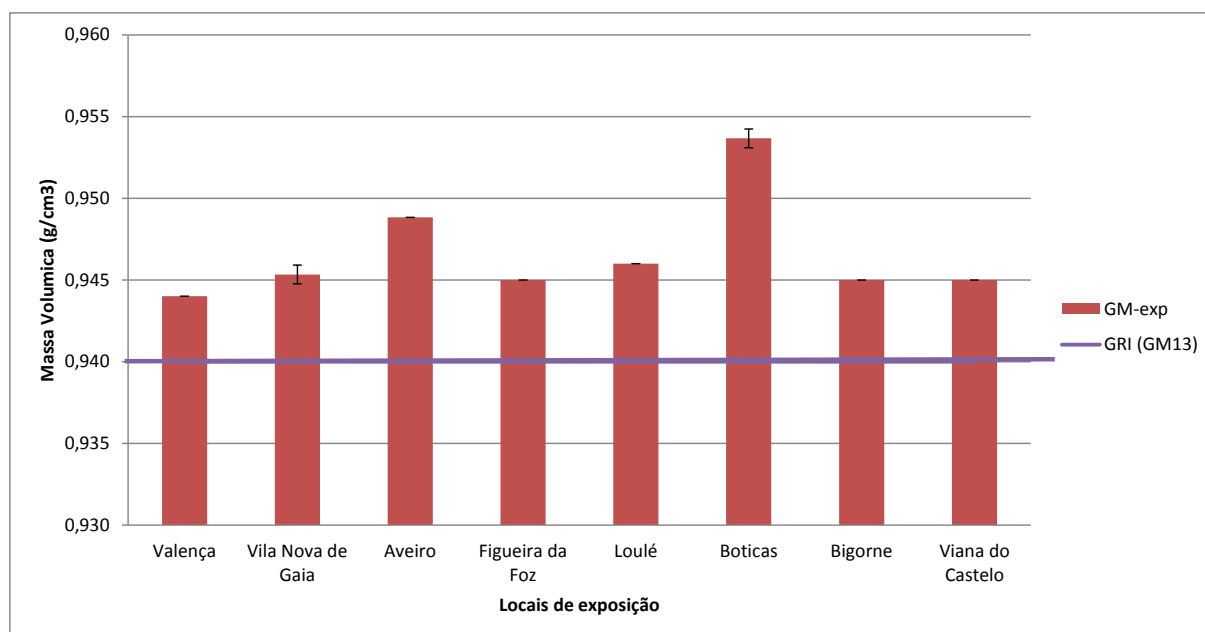


Figura 5.19 – Comparação da massa volúmica entre *GM-exp*/GRI (GM13) nos vários locais.

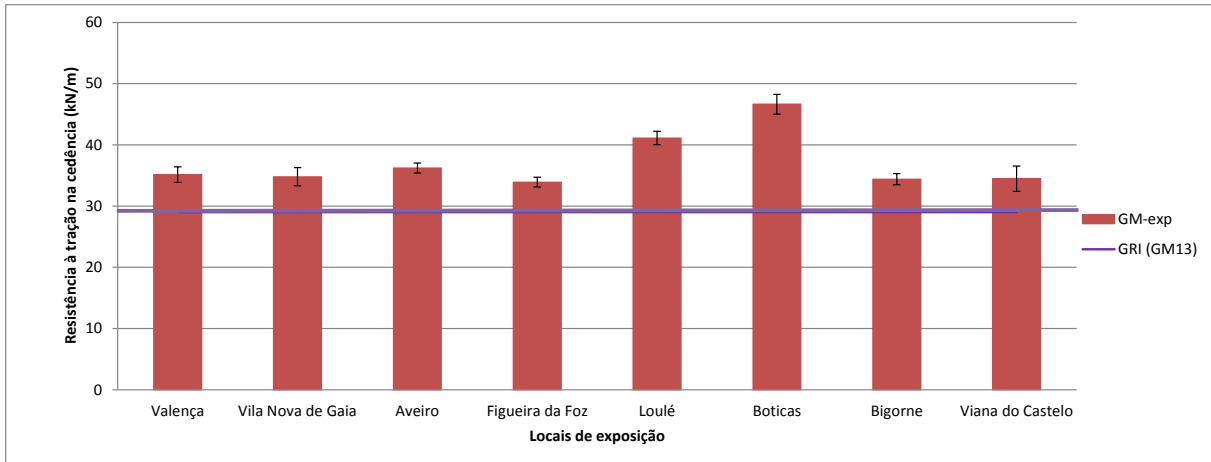


Figura 5.20 – Comparação da propriedade resistência à tração na cedência entre *GM-exp*/GRI (GM13) nos vários locais.

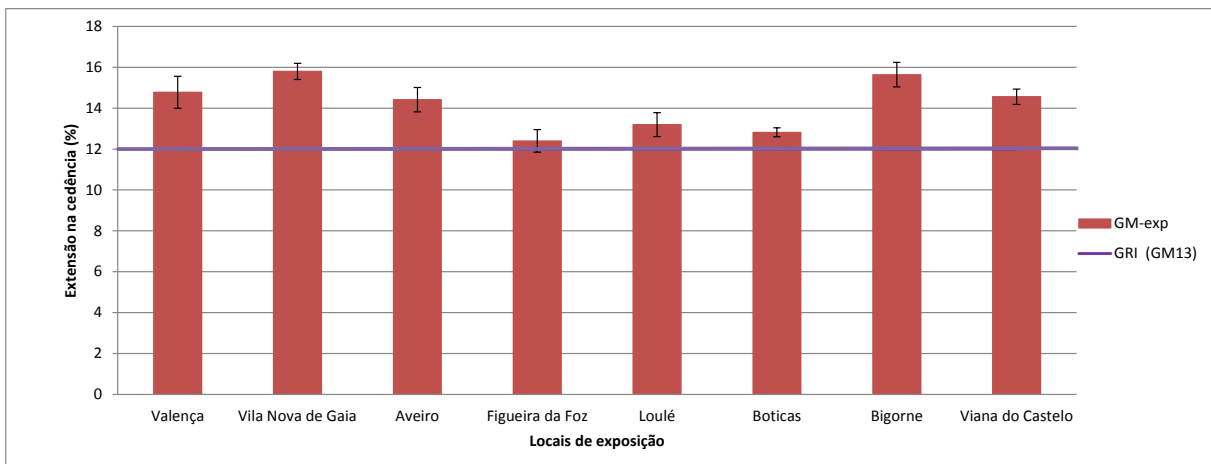


Figura 5.21 – Comparação da propriedade extensão na cedência entre *GM-exp*/GRI (GM13) nos vários locais.

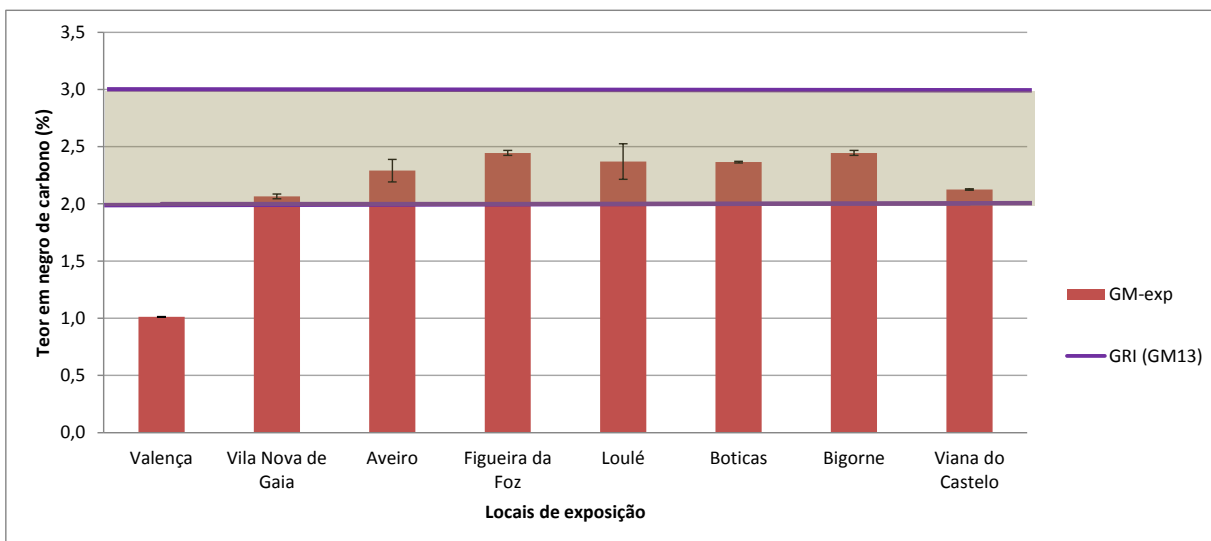


Figura 5.22 – Comparação da propriedade teor em negro de carbono entre *GM-exp*/GRI (GM13) nos vários locais.

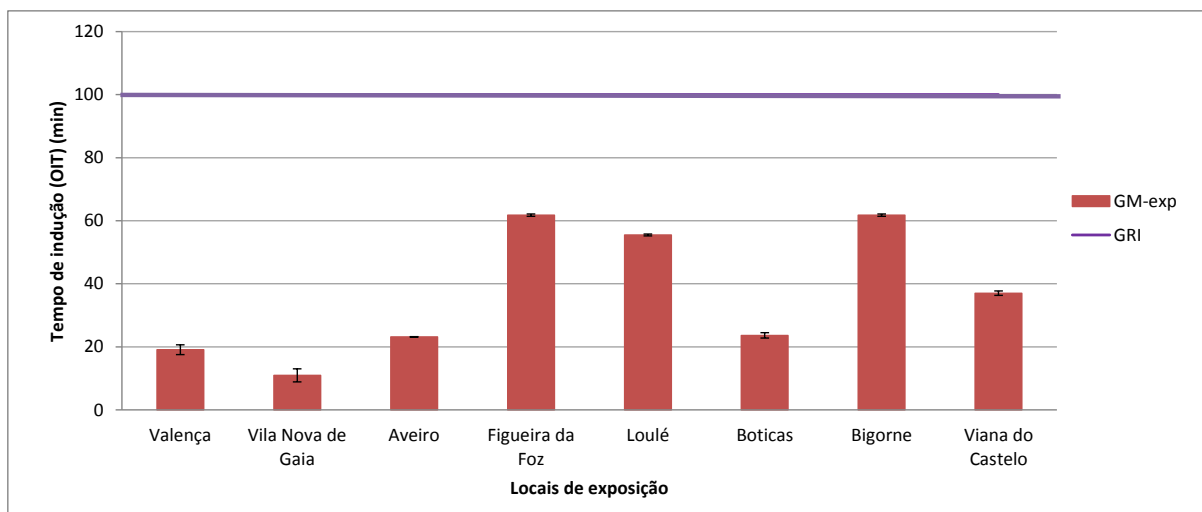


Figura 5.23 – Comparação da propriedade tempo de indução à oxidação (OIT) entre *GM-exp*/GRI (GM13) nos vários locais.

Da comparação dos valores obtidos experimentalmente para a massa volúmica (Figura 5.19), resistência à tração na cedência (Figura 5.20) e extensão na cedência (Figura 5.21) das *GM-exp* com os valores mínimos preconizados pelo GRI nos diferentes locais, verificou-se que todas as geomembranas expostas sem geotêxtil cumprem os requisitos mínimos recomendados para todos os locais de exposição.

No caso do teor em negro de carbono (Figura 5.22), com exceção de Valença todas as geomembranas expostas sem geotêxtil cumprem os requisitos mínimos recomendados pelo GRI (GM13) para todos os locais de exposição.

Para o tempo de indução à oxidação (Figura 5.23), nenhuma das geomembranas expostas cumpre os requisitos mínimos indicados pelo GRI (GM13) em nenhum dos locais de exposição.

Em suma, na comparação das propriedades, massa volúmica, resistência à tração na cedência, extensão na cedência, teor em negro de carbono e tempo de indução à oxidação determinadas para as geomembranas expostas sem geotêxtil, apenas o teor em negro de carbono (para um dos locais de exposição) e o tempo de indução à oxidação para as geomembranas expostas sem geotêxtil não cumprem os requisitos mínimos indicados pelo GRI (GM13), que recomenda que para esta propriedade as geomembranas apresentem um valor de OIT no mínimo de 100 minutos. Os resultados obtidos sugerem que ocorreu consumo de antioxidantes em todas as geomembranas expostas e que estas se encontram na Fase A de degradação (depleção de antioxidantes), proposta por Hsuan e Koerner (1998) por Greenwood *et al.* (2012), o final desta fase ocorre quando os valores de OIT atingem um valor mínimo, na ordem dos 0,5 minutos, indicando assim que todos os antioxidantes que na altura do fabrico, foram adicionados foram consumidos.

5.7 Considerações finais

Neste capítulo, foram definidos os valores de referência das diferentes propriedades. Tendo sido adotados os resultados obtidos pelo fabricante no seu controlo de fabrico, quando existentes, e, na ausência destes, recorreu-se aos valores indicados nas fichas técnicas.

Analisou-se a influência da exposição às condições climáticas sobre as diferentes geomembranas independentemente da matéria-prima usada no seu fabrico, tendo-se verificado que, de um modo geral, as propriedades em estudo foram influenciadas pela exposição às condições climáticas, especialmente o tempo de indução à oxidação e massa volúmica.

No caso da influência do IUV sobre geomembranas expostas em locais com diferentes condições climáticas, os resultados sugeriram que, no caso da GM-B, ocorreu um aumento da degradação à medida que as amostras se localizaram de norte para sul. No caso da GM-A, não foi possível estabelecer uma relação entre os resultados obtidos com a exposição à radiação UV, por esta geomembrana se encontrar numa zona onde o intervalo de IUV, está compreendido entre 4,5 e 5, tal como pode ver-se na Figura 2.28. Verificou-se, também, que ambas as geomembranas ao fim de 12 anos de exposição ainda têm antioxidantes na sua constituição.

No estudo da influência do geotêxtil de cobertura, os resultados obtidos sugeriram que, de um modo geral, o geotêxtil não foi eficaz na proteção da geomembrana aos efeitos da exposição às condições climáticas. Uma razão para o sucedido poderá estar relacionada com a degradação do geotêxtil de cobertura.

Na comparação dos resultados das diferentes propriedades com os valores mínimos preconizados pelo GRI (GM13), verificou-se que as geomembranas expostas sem geotêxtil cumpriam os requisitos mínimos indicados pelo GRI (GM13) e que apenas para o tempo de indução à oxidação os valores foram inferiores aos preconizados por este organismo, que recomenda um valor de OIT no mínimo de 100 minutos para as geomembranas.

A análise integrada dos resultados sugere que as geomembranas expostas se encontram na Fase A de degradação, designada por depleção de antioxidantes, pelo facto de ainda subsistirem antioxidantes nas geomembranas expostas.

6 | Conclusões e desenvolvimentos futuros

O presente trabalho pretendeu avaliar a evolução das propriedades das geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) expostas às condições climáticas durante 12 anos, em várias regiões geográficas de Portugal, com o objetivo de estudar a influência das radiações UV características das diferentes regiões sobre as propriedades das geomembranas fabricadas a partir da mesma matéria-prima. As amostras foram expostas com ou sem cobertura de geotêxtil, com vista a avaliação a eficácia do geotêxtil como proteção às geomembranas. O trabalho teve, também, por objetivo comparar as propriedades das geomembranas expostas sem geotêxtil com os requisitos mínimos presentemente preconizados pelo *Geosynthetic Research Institute* - GRI (GM13), com vista a verificar se estes materiais ainda cumprem os valores mínimos preconizados.

A influência da exposição às condições climáticas foi estudada mediante a comparação entre os resultados dos ensaios laboratoriais realizados sobre as amostras de geomembranas fabricadas a partir de diferentes resinas, expostas e sobre amostras não-expostas (referência). Para valores de referência foram adotados os resultados obtidos pelo fabricante no seu controlo de fabrico quando estes estavam disponíveis, e na ausência destes recorreu-se aos valores indicados nas fichas técnicas.

O trabalho iniciou-se com a apresentação dos diferentes tipos de geossintéticos e as suas funções, sendo dado relevo às principais aplicações destes materiais em vias de comunicação.

Foram apresentadas algumas definições que se consideraram necessárias para a compreensão dos mecanismos de degradação das geomembranas de PEAD e identificaram-se os mecanismos e as fases de degradação destes polímeros. Tendo sido identificados dois tipos de degradação: a degradação química devida à radiação UV (foto-oxidação) e a degradação por oxidação devida ao efeito da temperatura.

Foram abordadas, do ponto de vista teórico, as propriedades que se consideraram relevantes, nomeadamente 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, bem como a forma como estas evoluem quando as geomembranas PEAD se encontram expostas às condições climáticas.

Foi efetuada uma revisão bibliográfica, onde foram analisados alguns estudos realizados recentemente por Rowe *et al.* (2003), Lodi *et al.* (2007), Tarnowski & Baldauf (2012) e Rowe & Ewais (2014) em geomembranas de PEAD expostas às condições climáticas em diferentes locais do mundo, tendo estes autores sugerido que a vida útil das geomembranas depende das condições de exposição das mesmas.

Relativamente ao estudo realizado em Portugal, descreveram-se as condições de exposição das geomembranas e identificaram-se os locais onde foram expostas geomembranas iguais (fabricadas com o mesmo polímero). Indicaram-se as principais características dos materiais constantes nas

fichas técnicas dos diferentes materiais em estudo, bem como nos ensaios realizados pelo fabricante e pelo LNEC.

Foi realizada uma breve descrição dos métodos de ensaio realizados no LNEC, com o objectivo de identificar a evolução das características químicas e físicas das geomembranas expostas em diferentes localizações no país.

Foram apresentados os resultados obtidos experimentalmente para as diferentes propriedades em estudo (massa volúmica, resistência à tração e extensão na cedência e na rotura, índice de fluidez, teor em negro de carbono e do tempo de indução à oxidação) relativamente às geomembranas expostas com e sem cobertura de geotêxtil, em cada um dos locais de exposição às condições climáticas (Viana do Castelo, Aveiro, Boticas, Loulé, Vila Nova de Gaia, Bigorne Valença e Figueira da Foz). Apresentaram-se os valores obtidos para a única amostra de arquivo enviada ao LNEC (Viana do Castelo). Em apenas três locais de exposição (Aveiro, Boticas e Loulé), foi possível avaliar as propriedades das geomembranas expostas (com e sem cobertura de geotêxtil), uma vez que, para os restantes cinco locais a cobertura de geotêxtil já não existia.

Verificou-se que, para a resistência à tração e extensão na cedência, massa volúmica, índice de fluidez e teor em negro de carbono, não ocorreram grandes variações entre os valores obtidos para as geomembranas expostas com e sem geotêxtil. No caso do tempo de indução à oxidação, os valores obtidos experimentalmente apresentaram variações significativas entre os vários locais de exposição, no caso específico da geomembrana em arquivo, originária de Viana do Castelo, o valor obtido foi bastante elevado relativamente ao valor obtido para a geomembrana exposta sem cobertura de geotêxtil.

No que diz respeito à resistência à tração e extensão na rotura, verificou-se que ocorreu uma grande dispersão de valores para cada uma das amostras e também para cada local de exposição, tendo-se mantido esta situação tanto para as geomembranas expostas com e sem cobertura de geotêxtil, nos casos em que foi possível ter as duas situações de exposição. Considerou-se não ser possível determinar se as variações destas propriedades se podiam imputar à exposição das amostras, às condições climáticas ou à heterogeneidade do material. Por esta razão, a resistência à tração e a extensão na rotura não foram incluídas na análise dos resultados.

Verificou-se que, independentemente da matéria-prima usada no seu fabrico, de um modo geral, as propriedades das geomembranas foram influenciadas pela exposição às condições climáticas, sobretudo, o tempo de indução à oxidação e massa volúmica.

No caso da influência do IUV sobre geomembranas expostas em locais com diferentes condições climáticas, os resultados sugeriram, no caso da GM-B, ocorreu um aumento da degradação à medida que as amostras se localizaram de norte para sul. No caso da GM-A, não foi possível estabelecer uma relação entre os resultados obtidos com a exposição à radiação UV, por esta geomembrana se encontrar numa zona onde o intervalo de IUV. Verificou-se, também, que ambas as geomembranas ao fim de 12 anos de exposição ainda têm antioxidantes na sua constituição.

No estudo da influência do geotêxtil de cobertura, os resultados obtidos sugeriram que, de um modo geral, o geotêxtil não foi eficaz na proteção da geomembrana aos efeitos da exposição às condições climáticas, julga-se que uma das razões para o ocorrido pode ser atribuída à degradação do geotêxtil de cobertura.

Verificou-se que, na comparação dos resultados das diferentes propriedades com os valores mínimos preconizados pelo GRI (GM13), as geomembranas expostas cumpriam os requisitos mínimos recomendados e que apenas para o tempo de indução à oxidação se verificou que os valores foram inferiores aos recomendados por este organismo, que sugere que as geomembranas apresentem um valor de OIT no mínimo de 100 minutos.

A análise integrada dos resultados sugere que as geomembranas expostas se encontram na Fase A de degradação, designada por depleção de antioxidantes, pelo facto de ainda subsistirem antioxidantes nas geomembranas expostas.

Sugere-se a continuação do presente estudo para avaliar a evolução das propriedades das geomembranas durante um período de vida mais alargado, se possível até estas atingirem a Fase (C) de degradação, incluindo ensaios de determinação da resistência à fissuração (*stress cracking*).

Sugere-se, também, a medição da temperatura das geomembranas nos diferentes locais de exposição, com o objetivo de estabelecer uma relação entre o tempo de vida útil das geomembranas e a temperatura, conforme relatado por Rowe & Ewais (2014).

Por fim, sugere-se complementar o presente estudo, através da realização de ensaios de envelhecimento acelerado em laboratório, com radiação UV e a várias temperaturas, o mais representativas possível das condições registadas em Portugal, para estimar a vida útil das geomembranas aplicadas nas estradas.

Referências Bibliográficas

- Accorsi, J. & Romero, E., 2005. Special carbon blacks for plastics. In: *Plastics Eng.*, pp. 29-32.
- ASTM D 6693, 2010. *Standard Test Method for Determining Tensile Nonreinforced Polyethylene and nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes.*
- ASTM D 883, 2012. *Standard Terminology Relating to Plastics.*
- ASTM D1238, 2010. *Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastomer.*
- ASTM D1505, 2010. *Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.*:ASTM.
- ASTM D1603, 2011. *Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics.*
- ASTM D3895, 2007. *Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry.*
- Barroso, M., Brazão, C. & Lopes, M. G. D. A., 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 Geotécnia, Aveiro, Portugal*, pp. 305-316.
- Barroso, M. C. P. & Lopes, M. G., 2010. *Integridade das geomembranas: Influência da influência da exposição aos agentes atmosféricos.* Guimarães.
- Barroso, M. & Lopes, M. G., 2010. *Integridade das geomembranas: influência da exposição aos agentes atmosféricos.* Guimarães, 12º Cong. Nac. de Geotécnia, 26-29 Abril (CD-ROM).
- Cardoso, R., 2014. Influência das acções atmosféricas na funcionalidade de estruturas geotécnicas. *Revista de Geotecnia nº 130*, pp. 3-32.
- Carneiro, J. C., 2009. *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos.* Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coutinho, F. M. B., Mello, I. L. & de Santa Maria, L. C., 2003. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, pp. vol. 13, nº 1, p.1-13.
- Dantas, M. C. & Ramalho, M. D., 2011. *Jogo de Partículas.* 1ª edição ed. Lisboa: Texto.

Estradas.pt, 2015. *Portal das estradas*.

<http://www.estradas.pt/noticia/a21-engenharia-natural-na-estabilizacao-de-taludes>

[Consultado em 20 08 2015].

Ewais, A. M. R., Rowe, R. K. & Sheirs, J., 2014. Degradation behaviour of HDPE geomembranes with high and low initial high-pressure oxidative induction time. *ELSEVIER*, 42(Geotextiles and Geomembranes), pp. 111-126.

Geotecnia, S. P. d., 2012. [Online]

www.spgeotecnia.pt/igs

[Consultado em 2015].

Greenwood, J. H., Schroeder, H. F. & Voskamp, W., 2012. *Durability of Geosynthetics*, CUR committee C187.

Halse, Y., Wiertz, J., Rigo, J. M. & Cazzuffi, D. A., 1991. *Chemical Identification Methods used to characterize Polymeric geomembranes*. Cambridge, Great Britain, Chapman and Hall.

Haxo, H. E. & Nelson, N. A., 1984. Factors in the durability of polymeric membrane liners. Vol II. In: *Proceedings of the International Conference on Geomembranes, Denver*. Denver, Colorado: IFAI Publishers, pp. 287-292.

Hsuan, Y. G. & Koerner, R. M., 1998. Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, pp. 532-541.

Hsuan, Y. G. & Koerner, R. M., 1998. Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes.. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, pp. 532-541.

IGS, Portugal, 2014. [Online]

www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS

[Consultado em 01 09 2015].

IGS, 2011. *spgeotecnia.pt* [Online]

www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/Terminologia_Geossinteticos.pdf

[Consultado em 10 05 2015].

IPMA, 2015.[Online]

www.ipma.pt/pt/enciclopedia/amb.atmosfera/uv/index.html

[Consultado em 29 Novembro 2015].

ISO 18553, 2002. *Method for the assessment of the degree of pigment or carbon black dispersion in polyolefin pipes, fittings and compounds.*

Jenner, C., 2005. The Reinforcement of the Granular Layers of Roads and Railways. *1 Seminário Português sobre Geotecnia*, Novembro, pp. 103-125.

Koerner, R. K., Islam, M. Z. & Hsuan, Y. G., 2008. Leachate chemical composition effects on OIT depletion in an HDPE geomembrane. *Geosynthetics International*, Volume 15 (2), pp. 136-151.

Koerner, R. M., 2005. Designing with geo synthetics. In: *Designing with geo synthetics*. New Jersey, Upper Saddle River: PEARSON EDUCATION. I.

Koerner, R. M. & Hsuan, Y. G., 2003. *Lifetime prediction of polymeric geomembranes used in new dam construction and dam rehabilitation*. Pennsylvania.

L., B. R., Lundgren, C. J., Harris, M. B. & Blaine, 1997. Oxidative Induction Time - A Review of DSC Experimental Effects, Oxidative Behavior of Materials by Thermal Analytical Technics, ASTM 1326. A. T. Riga and G. H. Patterson, Eds. *American Society for Testing and Materials*.

Lima, C., 2007. [Online]

<http://educa.fc.up.pt/ficheiros/noticias/69/documentos/108/>

[Consultado em 13 05 2015].

Lodi, P. C., 2003. *Aspectos da degradação de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Policloreto de Vinila (PVC)*. São Carlos, Brasil: Universidade de São Paulo.

Lodi, P. C., Bueno, B. S. & Zornberg, J. G., 2007. Degradação de geomembranas poliméricas após exposição à intempérie. *REGEO*.

Lopes, M. d. G. A., 1994. *Geotêxteis Principais Tipos Propriedades e Ensaio*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Lopes, M. d. G. A. & Barroso, M., 2004. *Mechanical Performance of HDPE Geomembranes Seams After Sunlight Exposure*.

Lopes, M. P. & Lopes, M. d. L., 2010. *A Durabilidade dos Geossintéticos*. 1ª ed. Porto: Feup edições.

Malpass, D. B., 2010. *Introduction to Industrial Polyethylene - Properties, Catalysts, Processes*. Wiley, Massachusetts.

NP EN ISO1133, 2007. *Materiais plásticos. Determinação do índice de fluidez em massa (MFR) e em volume (MVR) dos materiais termoplásticos*.

Nunes, L. F. et al., 2013. Processamento e análise de dados IUV sobre Portugal, obtidos por satélite.

Palmeira, E. M., s.d. *IGS Portugal*.

www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS

[Consultado em 31 agosto 2015].

Peacock, A. J., 2000. *Handbook of Polyethylene - Structures, Properties and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Pelte, T., Pierson, P. & Gourc, J. P., 1994. Thermal analysis of geomembranes exposed to solar radiation. *Geosynthetics International*, 1, pp. 21-24.

Rocha, M. C. G., Coutinho, F. M. B. & Balke, S., 1994. Índice de Fluidez: Uma Variável de Controle de Processos de Degradação Controlada de Polipropileno por Extrusão Reativa. *Polímeros: Ciência e Tecnologia* (2), pp. 33-37.

Rowe, R. K. & Ewais, A. M. R., 2014. Ageing of exposed geomembranes at locations with different climatological conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 326-343.

Rowe, R. K. & Sangam, H. P., 2002. Durability of HDPE geomembranes. *Elsevier, Geotextiles and Geomenbranes*, Volume 20, pp. 7-95.

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.

Sharma, H. D. & Lewis, S. P., 1994. Waste containmemt system, waste stabilization and landfills, design an evaluation. In: Nova York: Wiley & Sons, Inc..

Suits, L. D. & Hsuan, Y. G., 2003. Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 21, pp. 111-122.

Tarnowski, C. & Baldauf, S., 2012. Ageing resistance of HDPE-geomembranes - Evaluation of long-term behavior under consideration of project experiences.

Vertematti, J. C., 2004. *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. ISBN 85-212-0344-6 ed. São Paulo: Edgard Blucher.

Anexo – Quadro resumo das propriedades das geomembranas

Quadro 6.1 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade massa volúmica nos diferentes locais.

Local	Propriedade	Amostra		
		<i>GM-arq</i>	<i>GM-cob</i>	<i>GM-exp</i>
Boticas	Massa Volúmica (g/cm ³)	--	0,95	0,95
Bigorne		--	--	0,94
Viana do Castelo		0,94*	--	0,95
Valença		--	--	0,94
Vila Nova de Gaia		--	--	0,95
Aveiro		--	0,95	0,95
Figueira da Foz		--	--	0,96
Loulé		--	0,95	0,95

Nota: * considerado valor de referência

Quadro 6.2 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade índice de fluidez nos diferentes locais.

Local	Propriedade	Amostra		
		<i>GM-arq</i>	<i>GM-cob</i>	<i>GM-exp</i>
Boticas	Índice de fluidez (g/10 min)	--	1,052	0,881
Bigorne		--	--	2,303
Viana do Castelo		2,372*	--	2,373
Valença		--	--	2,546
Vila Nova de Gaia		--	--	2,706
Aveiro		--	3,354	3,412
Figueira da Foz		--	--	1,129
Loulé		--	1,073	1,037

Nota: * considerado valor de referência

Quadro 6.3 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade teor em negro de carbono nos diferentes locais.

Local	Propriedade	Amostra		
		<i>GM-arq</i>	<i>GM-cob</i>	<i>GM-exp</i>
Boticas	Teor em negro de carbono (%)	--	2,3	2,4
Bigorne		--	--	2,4
Viana do Castelo		2,1*	--	2,1
Valença		--	--	1,0
Vila Nova de Gaia		--	--	2,1
Aveiro		--	2,3	2,3
Figueira da Foz		--	--	2,4
Loulé		--	3,6	3,5

Nota: * considerado valor de referência

Quadro 6.4 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade as propriedades resistência à tração e extensão na cedência e na rotura nos diferentes locais.

Local	Propriedade	Amostra		
		GM-arq	GM-cob	GM-exp
Boticas	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	43,0	46,6
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	47,0	37,1
	Extensão na cedência (%)	--	13,6	12,8
	Extensão na rotura (%)	--	749	563
Bigorne	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	--	34,4
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	--	46,7
	Extensão na cedência (%)	--	--	15,6
	Extensão na rotura (%)	--	--	789
Viana do castelo	Resistência à tração na cedência (kN/m)	36,5*	--	34,5
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	44,7*	--	43,0
	Extensão na cedência (%)	14,7*	--	14,6
	Extensão na rotura (%)	830*	--	806
Valença	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	--	35,1
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	--	49,1
	Extensão na cedência (%)	--	--	14,8
	Extensão na rotura (%)	--	--	911
Vila Nova de Gaia	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	--	34,5
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	--	66,8
	Extensão na cedência (%)	--	--	15,7
	Extensão na rotura (%)	--	--	1210
Aveiro	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	35,7	36,2
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	60,1	35,0
	Extensão na cedência (%)	--	14,6	14,4
	Extensão na rotura (%)	--	1152	608
Figueira da Foz	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	--	33,9
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	--	29,7
	Extensão na cedência (%)	--	--	12,4
	Extensão na rotura (%)	--	--	738
Loulé	Resistência à tração na cedência (kN/m)	--	40,6	41,1
	Resistência à tração na rotura (kN/m)	--	63,4	49,8
	Extensão na cedência (%)	--	12,6	13,2
	Extensão na rotura (%)	--	1180	943

Nota: * considerados valores de referência

Quadro 6.5 – Resumo dos valores obtidos experimentalmente para a propriedade tempo de indução à oxidação nos diferentes locais.

Local	Propriedade	Amostra		
		<i>GM-arq</i>	<i>GM-cob</i>	<i>GM-exp</i>
Boticas	Tempo de indução à oxidação (min)	--	22,4	23,6
Bigorne		--	--	61,8
Viana do Castelo		82,2*	--	37
Valença		--	--	19,1
Vila Nova de Gaia		--	--	11,0
Aveiro		--	9,6	23,2
Figueira da Foz		--	--	61,8
Loulé		--	59,6	55,5

Nota: * considerado valor de referência