

INTEGRIDADE DAS GEOMEMBRANAS: INFLUÊNCIA DA EXPOSIÇÃO AOS AGENTES ATMOSFÉRICOS

THE INTEGRITY OF GEOMEMBRANE LINERS: EFFECT OF WEATHERING EXPOSURE

Barroso, M.C.P., *LNEC, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*

Lopes, M.G., *ISEL, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.ipl.pt*

RESUMO

Em Portugal, os sistemas de confinamento de fundo e taludes dos aterros de resíduos incluem barreiras múltiplas, tipicamente constituídas por uma geomembrana, geralmente de polietileno de alta densidade, um geossintético bentonítico e uma camada de solo argiloso compactada. A geomembrana é fundamental para minimizar a migração dos poluentes para o meio circundante. Contudo, o desempenho da geomembrana a longo prazo pode ser comprometido pela exposição aos agentes atmosféricos, particularmente na zona de soldadura entre painéis adjacentes. Para estudar este problema, está em curso, desde 1999, um programa de investigação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Nesta comunicação apresentam-se os resultados da evolução das propriedades mecânicas das soldaduras entre painéis e a evolução das propriedades físicas, mecânicas e de “endurance” da geomembrana, após 10 anos de exposição.

ABSTRACT

Landfills are generally designed to protect the environment against contaminants by using composite liners. In Portugal, they typically include a geomembrane, a geosynthetic clay liner and a compacted clay liner. The geomembrane is essential to minimize the migration of pollutants into the surrounding environment. However, the performance of the geomembrane in the long term may be compromised by weathering exposure, particularly in the area of welding between adjacent panels (seams). To address this issue, a research programme is under way at *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*. This paper discusses evolution of mechanical properties of the seams, as well as the evolution of physical, mechanical and endurance properties of the geomembrane after 10 years of exposure.

1. INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos são obras de engenharia estruturalmente complexas, concebidas para minimizar o efeito poluente dos resíduos no meio ambiente. Para o efeito, incluem sistemas de confinamento de fundo e de taludes, que em Portugal, incluem barreiras múltiplas, tipicamente constituídas por uma geomembrana, geralmente de polietileno de alta densidade (PEAD), um geossintético bentonítico e uma camada de solo argiloso compactada. Nestas barreiras, a geomembrana desempenha um papel fundamental, exercendo a função de barreira activa à migração dos poluentes.

As propriedades das geomembranas podem alterar-se, devido ao efeito dos agentes atmosféricos, nomeadamente dos raios ultravioleta (UV) presentes na radiação solar e da temperatura, o que pode comprometer o seu desempenho a longo prazo. Particularmente vulneráveis ao envelhecimento, parecem ser as soldaduras entre painéis adjacentes, em

resultado das solicitações mecânicas e térmicas a que as geomembranas são sujeitas durante o processo de soldadura.

Com o objectivo de estudar a evolução das propriedades das geomembranas de PEAD expostas aos agentes atmosféricos e em especial as soldaduras, realizadas pelo método de termofusão, está em curso, desde 1999, um programa de investigação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o apoio das empresas concessionárias dos aterros multimunicipais de resíduos sólidos urbanos (RSU) portugueses.

O estudo desenvolveu-se em duas fases. A primeira consistiu no envelhecimento natural dos materiais, por exposição aos agentes atmosféricos. Para o efeito, durante a construção dos aterros de resíduos foram preparadas amostras, com uma soldadura por termofusão na zona central, as quais foram deixadas expostas, *in situ*. Na segunda fase, após 1, 2, 4 e 10 anos de exposição, foram recolhidos provetes, para avaliar a evolução das propriedades mecânicas da soldadura. Os resultados relativos à primeira fase e aos períodos de exposição de 1, 2 e 4 anos foram apresentados por Lopes e Barroso (2004) e por Barroso *et al.* (2004).

Nesta comunicação apresentam-se os resultados dos ensaios mecânicos obtidos em amostras de soldaduras expostas durante 10 anos, os quais são comparados com os obtidos em amostras de soldaduras não-expostas. Para avaliação da evolução das propriedades físicas, mecânicas e de “endurance” da geomembrana propriamente dita, apresentam-se igualmente os resultados de ensaios realizados sobre as mesmas amostras, mas fora da zona da soldadura.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1. Amostras para Ensaio

O estudo da influência da exposição aos agentes atmosféricos em soldaduras, realizadas por termofusão, de geomembranas de PEAD foi realizado em 8 aterros de RSU portugueses. Começou-se por dividir em duas partes as amostras de geomembrana com uma soldadura dupla a meio (Figura 1a), uma parte foi enviada ao LNEC (não-exposta), e a outra parte permaneceu exposta nos aterros. A localização dos aterros envolvidos neste estudo foi apresentada por Barroso *et al.* (2004). Nos aterros, as amostras expostas foram colocadas em taludes de fácil acesso (fora do aterro), ou em coberturas de edifícios (Figura 1b).

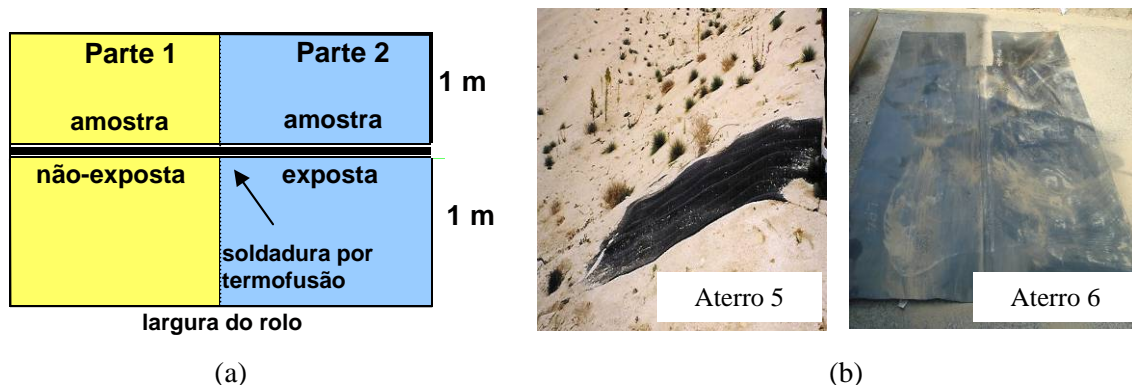


Figura 1 - Esquema de Preparação das Amostras (a) e Amostras Expostas (b)

No Quadro 1 estão resumidas as principais características (indicadas nas fichas técnicas) das geomembranas de PEAD, com 2 mm de espessura, usadas nos aterros.

Quadro 1- Principais Características das Geomembranas (GMs)

GMs	Massa volúmica (ASTM D792)	Índice de fluidez (190 °C/5 kg) (ASTM D1238)	Resistência à tracção/extensão (ASTM D638)		Aterro onde estão expostas as GM
			na cedência	na rotura	
A	> 0,944 g/cm ³	0,7-1,3 g/10 min	> 16 N/mm ² /10 %	> 20 N/mm ² / 600 %	5, 7, 8
B	> 0, 942 g/cm ³	< 3 g/10 min	> 15 N/mm ² /10 %	> 27 N/mm ² / 700 %	1, 3, 4, 6

2.2. Programa de Ensaios

O desempenho das geomembranas de PEAD a longo prazo é afectado pelo envelhecimento que os materiais sofrem, principalmente, em consequência da termo-oxidação (envelhecimento térmico), da foto-oxidação (envelhecimento devido aos raios ultravioletas) e do desenvolvimento de fissuras de tracção (*stress cracking*).

A questão das fissuras de tracção sai do âmbito deste trabalho, pelo que será abordada apenas a degradação causada pela oxidação. Genericamente, pode dizer-se que a vida útil de uma geomembrana de PEAD num aterro de resíduos pode ser dividida em três fases. A Fase I caracteriza-se pelo consumo dos antioxidantes. Com a oxidação do polímero, inicia-se a degradação das propriedades mecânicas das geomembranas, primeiro, sem diminuição mensurável dos seus valores (Fase II) e, depois, com a sua deterioração (Fase III). A deterioração das propriedades mecânicas da geomembrana (redução no valor das propriedades para um valor arbitrário, geralmente, 50% do valor original da propriedade em causa) é devida a modificações ocorridas, a nível estrutural, no polímero (Hsuan e Koerner, 1998).

A exposição da geomembrana aos raios UV tem efeitos que vão desde o endurecimento, à redução de resistência à tracção, rasgamento e deformação. Temperaturas elevadas também podem conduzir à diminuição da resistência à tracção 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 consequente lixiviação do antioxidante, implica uma maior susceptibilidade das geomembranas à oxidação e aos raios UV (Haxo e Nelson, 1984).

Neste contexto, o objectivo principal deste trabalho consistiu na avaliação do estado das geomembranas ao fim de 10 anos de exposição a agentes atmosféricos, que incluiu, por um lado, o estudo da evolução das propriedades físicas mecânicas e de “endurance” da geomembrana propriamente dita e, por outro lado, o estudo da evolução das propriedades mecânicas das soldaduras entre painéis realizadas por termofusão (Quadros 2 e 3).

Quadro 2- Programa de Ensaios para o Estudo da Evolução das Propriedades das Geomembranas

Nome do Ensaio	Norma de Ensaio	Propriedade
“Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique”	ASTM D 1505	massa volúmica
“Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer”	ASTM D 1238-c ou EN ISO 1133 (190°C/5kg)	índice de fluidez (melt flow index)
“Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes”	ASTM D6693*	resistência à tracção e extensão na cedência
“Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics”	ASTM D 1603	teor em negro de carbono
“Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry”	ASTM D 3895	tempo de indução à oxidação

(*) Sustitui a norma ASTM D 638: “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”

Quadro 3- Programa de Ensaios para o Estudo da Evolução das Propriedades Mecânicas das Soldaduras

Nome do Ensaio	Norma de Ensaio	Propriedade
“Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods”	ASTM D 6392*	resistência ao arranque
		resistência ao corte

(*) Sustitui a norma ASTM D 4437: “Standard Practice for Non-destructive Testing (NDT) for Determining the Integrity of Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes”

2.2.1. Estudo da Evolução das Propriedades Mecânicas das Soldaduras

A resistência mecânica das soldaduras foi determinada através de dois tipos de ensaios destrutivos: ensaios de arranque (*peel test*) e ensaios de corte (*shear test*), os quais estão ilustrados nas fotografias apresentadas na Figura 2a e 2b, respectivamente. No ensaio de resistência ao arranque procura-se avaliar a qualidade da soldadura (Peggs e Little, 1985). No ensaio de resistência ao corte procura-se avaliar de que forma o processo de soldadura afecta a resistência da geomembrana adjacente à soldadura (Peggs, 1990).

Saliente-se que os ensaios de arranque foram efectuados sobre as duas soldaduras da dupla soldadura, considerando-se uma a “soldadura exterior” e a outra a “soldadura interior”, separadas pelo canal central, tal como se esquematiza na Figura 2c.

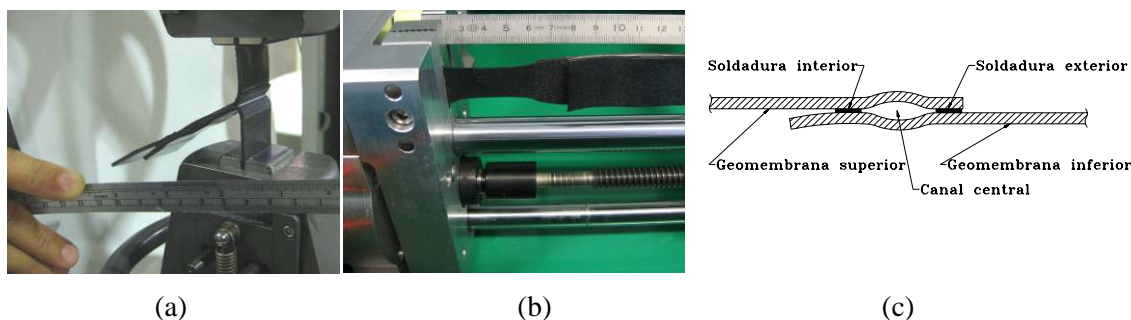


Figura 2 – Ensaios de Arranque (a) e de Corte (b) e Esquema das Soldaduras Exterior e Interior (c)

Os ensaios de arranque e de corte foram realizados segundo a norma ASTM D 6392, actualmente recomendada pelo GRI-GM 13 (1997) em vez da norma ASTM D 4437, uma vez que a primeira é mais abrangente (inclui a análise dos tipos de rotura para ambos os ensaios, quer para as soldaduras por termofusão, quer para as soldaduras por extrusão). De referir que a norma ASTM D 4437 foi utilizada nos estudos efectuados para as amostras expostas ao fim de 1, 2 e 4 anos (ver Barroso *et al.*, 2004; Lopes e Barroso, 2004). No entanto, no que respeita aos parâmetros em análise no presente estudo, as resistências ao arranque e ao corte, os resultados de ambas as normas são comparáveis.

2.2.2. Estudo da Evolução das Propriedades Físicas, Mecânicas e de “Endurance” das Geomembranas

Ensaio de Determinação da Massa Volúmica

Os ensaios de determinação da massa volúmica foram realizados segundo a norma ASTM D 1505. Este método é geralmente utilizado para materiais com massa volúmica inferior a 1 g/cm^3 , que é normalmente o caso das geomembranas de PEAD. Estas, utilizando resinas com massas volúmicas na gama dos $0,934$ a $0,938\text{ g/cm}^3$, só conseguem atingir valores da massa volúmica da ordem dos $0,941$ a $0,950\text{ g/cm}^3$ (Rowe *et al.*, 2003), devido à adição de negro de carbono ou outros aditivos geralmente incorporados nas geomembranas.

A determinação da massa volúmica é importante por estar directamente relacionada com a cristalinidade (Halse *et al.*, 1991), afectando as propriedades térmicas (ponto de endurecimento, viscosidade e temperatura de fusão), mecânicas (resistência à tracção e flexibilidade) e químicas (resistência química, ao “*stress cracking*” e permeabilidade).

Ensaio de Determinação do Índice de Fluidez (melt flow index - MFI)

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

O valor do MFI permite avaliar indirectamente o peso molecular dos polímeros termoplásticos (um valor alto do MFI indica que o polímero ensaiado apresenta um peso molecular baixo), propriedade que condiciona directamente as propriedades mecânicas destes materiais. Contudo, a comparação de valores de MFI só tem significado se forem comparadas geomembranas de um mesmo polímero (Koerner, 1998).

Ensaio de Determinação da Resistência à Tracção/Extensão

Os ensaios para avaliação da resistência à tracção/extensão foram realizados segundo a norma ASTM D6693, actualmente preconizada pelo GRI-GM13 (1997) em vez da ASTM D638, sendo a principal diferença entre ambas a temperatura de realização dos ensaios. Tratando-se de geomembranas não reforçadas e com espessuras superiores a 2 mm utilizaram-se provetes em forma de halter com dimensões específicas (identificado na norma como tipo IV). As geomembranas de PEAD apresentam um pico bem definido (ponto de cedência) para pequenas extensões (cerca de 15%). Com o aumento da sollicitação o provete na sua parte central sofre um alongamento (com diminuição de largura) fazendo com que os valores da resistência diminuam após o ponto de cedência, devido ao ensaio se realizar a uma taxa 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 (Figura 3).

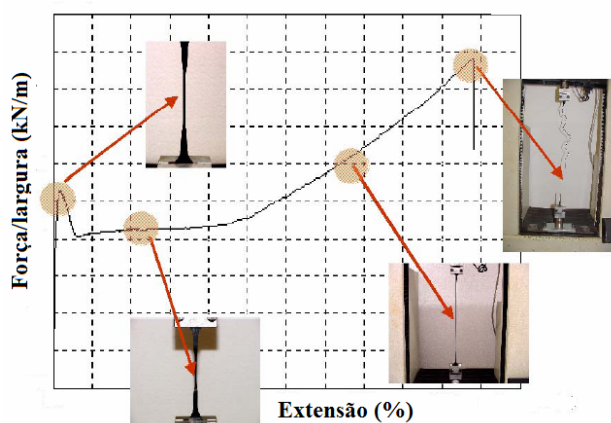


Figura 3 – Comportamento Força/Extensão de Geomembranas de PEAD (Lodi, 2003)

As propriedades mecânicas (tracção/extensão) são úteis para avaliar a estabilidade da oxidação (causada pelo envelhecimento). Inicialmente a oxidação pode levar a um aumento da resistência à tracção na cedência e uma diminuição na extensão na cedência. À medida que a oxidação prossegue, a degradação acentua-se e a geomembrana torna-se extremamente frágil (Rowe *et al.*, 2009).

Ensaio de Determinação do Teor em Negro de Carbono

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

O negro de carbono é um aditivo que se junta à formulação da geomembrana para minimizar os efeitos negativos dos raios UV sobre os polímeros, os quais conduzem à degradação das propriedades mecânicas das geomembranas, nomeadamente ao surgimento de comportamento frágil e de fissuras.

A percentagem de negro de carbono tipicamente adicionada às geomembranas de PEAD é da ordem dos 2 a 3 %.

Ensaio de Determinação do Tempo de Indução à Oxidação (ensaio de OIT)

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

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O programa de ensaios está em curso, tendo sido já efectuados a generalidade dos ensaios relativos às geomembranas dos aterros 5 e 6 (com excepção dos ensaios de tracção/extensão), cujos resultados são apresentados e discutidos nas secções que se seguem.

3.1. Resultados dos Ensaios de Arranque (*peel test*)

Em primeiro lugar, verificou-se se a resistência ao arranque das soldaduras não-expostas tinha evoluído ao longo do tempo. As variações de resistência observadas foram da mesma ordem de grandeza da dispersão dos resultados (desvio padrão), assumindo-se, por isso, que a resistência ao arranque das amostras não-expostas não sofreu alterações significativas ao longo do tempo.

Seguidamente, procedeu-se à análise das resistências ao arranque obtidos para as amostras expostas durante 10 anos aos agentes atmosféricos, nos aterros 5 e 6 (Figura 4).

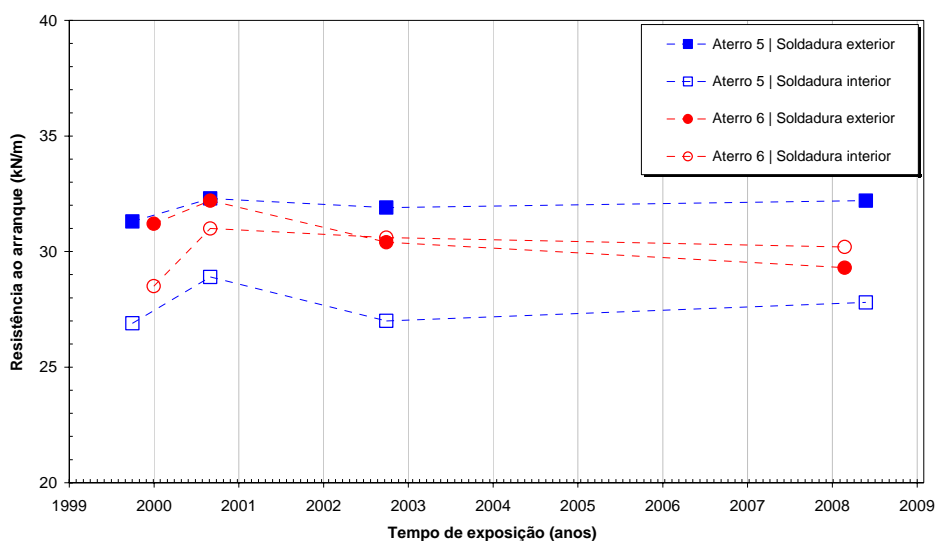


Figura 4 – Evolução da Resistência ao Arranque em Função do Tempo de Exposição aos Agentes Atmosféricos

Tal como pode observar-se os valores da resistência ao arranque não sofreram alterações significativas ao longo do tempo, tanto no caso da soldadura exterior, como no caso da soldadura interior, para ambos os aterros. Estes resultados sugerem que a quantidade de antioxidantes consumidos ainda não atingiu a Fase III de degradação da geomembranas na zona de soldadura e, por isso, as propriedades mecânicas permanecem praticamente inalteradas, de um ponto de vista quantitativo.

Os resultados obtidos foram, também, comparados com os critérios de aceitação/rejeição preconizados pelo GRI-GM19 (2002), designadamente os valores mínimos requeridos no âmbito do controlo de qualidade dos aterros de resíduos, para as soldaduras por termofusão. Os critérios em questão foram detalhadamente discutidos por Barroso e Lopes (2008), sendo os valores mínimos de resistência ao arranque exigidos de 23,0 e 21,6 kN/m, respectivamente, para as amostras dos aterros 5 e 6.

A comparação efectuada mostra que, após 10 anos de exposição, as soldaduras continuam a apresentar valores da resistência ao arranque superiores aos requisitos mínimos mencionados.

3.2. Resultados dos Ensaios de Corte (*shear test*)

Na Figura 5 apresentam-se os resultados obtidos dos ensaios de corte para as amostras expostas durante 10 anos aos agentes atmosféricos, nos aterros 5 e 6.

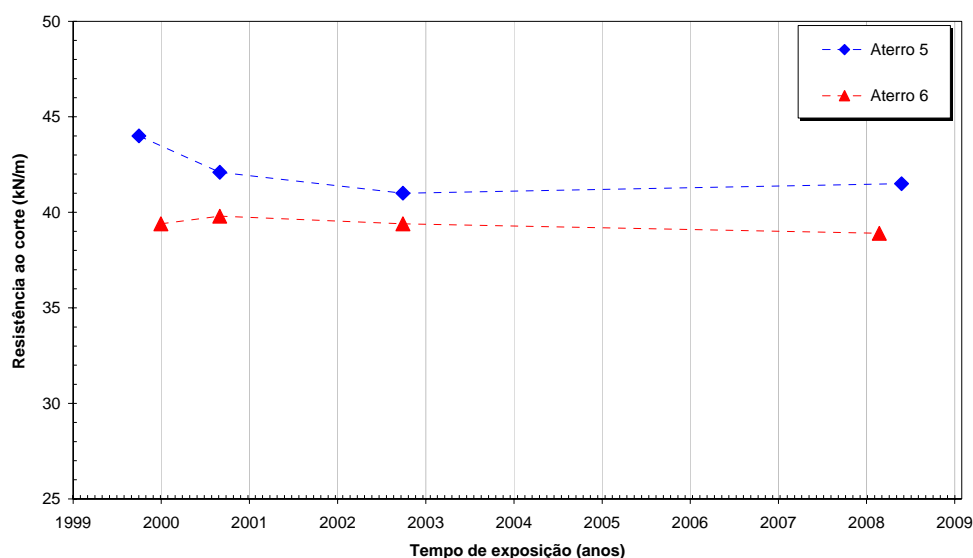


Figura 5 – Evolução da Resistência ao Corte em Função do Tempo de Exposição aos Agentes Atmosféricos

Observa-se que os valores da resistência ao corte não sofreram alterações expressivas ao longo do tempo, em ambos aterros. Estes resultados tendem a mostrar que a quantidade de antioxidantes consumidos na zona da soldadura ainda não atingiu a Fase III de degradação da geomembranas, pelo que as propriedades mecânicas não apresentam alterações quantitativas mensuráveis.

Os resultados obtidos foram igualmente comparados com os critérios de aceitação/rejeição actualmente preconizados pelo GRI-GM19 (2002), nomeadamente os valores mínimos requeridos para este tipo de soldaduras, sendo os valores mínimos aceitáveis para a resistência ao corte das soldaduras de 30,4 e 28,5 kN/m, respectivamente, para as amostras dos aterros 5 e 6.

A comparação levada a cabo indica que, após 10 anos de exposição, as soldaduras continuam a apresentar valores da resistência ao corte superiores aos requisitos mínimos mencionados.

3.3. Resultados dos Ensaio de Determinação da Massa Volúmica

Os resultados dos ensaios da massa volúmica são apresentados no Quadro 4, para as amostras não-expostas e expostas.

Quadro 4 – Resultados dos Ensaio de Determinação da Massa Volúmica

Aterro	Amostra	Massa volúmica (g/cm ³)
5	não-exposta	0,950
	exposta	0,950
6	não-exposta	0,942
	exposta	0,946

Comparando os valores obtidos para os dois tipos de amostras, verifica-se que não ocorreram alterações significativas durante os 10 anos de exposição, em ambos os aterros.

3.4. Resultados dos Ensaio de Determinação do Índice de Fluidez (melt flow index - MFI)

No Quadro 5 apresentam-se os valores de MFI obtidos neste estudo.

Quadro 5 – Resultados dos Ensaio de Determinação do Índice de Fluidez

Aterro	Amostra	Índice de fluidez (190 °C/5 kg) (g/10 min)
5	não-exposta	1,02
	exposta	0,99
6	não-exposta	2,82
	exposta	2,66

O primeiro aspecto a destacar prende-se com a diferença entre os valores obtidos para as amostras dos dois aterros, o que é expectável quando são geomembranas diferentes (ver Quadro 1). Tal como anteriormente referido, neste caso a comparação dos MFIs não tem significado.

Relativamente aos MFIs das amostras não-expostas e expostas no mesmo aterro, observa-se que ocorreu uma ligeira diminuição nos valores desta propriedade. Estes resultados são consistentes com os indicados por Rowe *et al.* (2009).

3.5. Resultados dos Ensaio de Determinação do Teor em Negro de Carbono

Os valores dos teores em negro de carbono obtidos para as amostras não-expostas e expostas são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados dos Ensaio de Determinação do Teor em Negro de Carbono

Aterro	Amostra	Teor em Negro de Carbono (%)
5	não-exposta	2,2
	exposta	2,3
6	não-exposta	2,1
	exposta	2,1

Pode verificar-se que os valores obtidos são todos semelhantes, não havendo diferenças significativas entre as amostras não-expostas e expostas. Estes resultados sugerem que o teor negro de carbono não foi afectado pela exposição da geomembrana aos raios UV, durante o período em consideração, no caso dos dois aterros.

3.6. Resultados dos Ensaios de determinação do Tempo de Indução à Oxidação (OIT)

Os tempos de indução à oxidação obtidos para as amostras ensaiadas neste estudo são indicados no Quadro 7.

Quadro 7 – Resultados dos Ensaios de Determinação do Tempo de Indução à Oxidação (OIT)

Aterro	Amostra	Tempo de Indução à Oxidação (min)
5	não-exposta	15,2
	exposta	13,7
6	não-exposta	-
	exposta	21,3

Em primeiro lugar, os tempos de indução à oxidação são muito baixos, comparativamente com os valores típicos das geomembranas actuais e com as recomendações do GRI-GM13 (1997), as quais apontam para valores mínimos de 100 minutos. No entanto, Rowe *et al.* (2003) indicam valores de OIT inferiores a 50 minutos para geomembranas de PEAD fabricadas na década de oitenta.

Em segundo lugar, é de assinalar a diferença registada entre os valores correspondentes às amostras do Aterro 5 e do Aterro 6, o que é expectável quando as geomembranas têm diferentes tipos de antioxidantes. Tal como anteriormente referido, a comparação de valores de OIT nessas condições perde significado.

Por último, relativamente ao Aterro 5, como seria de esperar verificou-se que a amostra exposta sofreu uma ligeira diminuição relativamente à amostra não-exposta.

4. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentaram-se os resultados dos ensaios realizados em amostras de geomembranas de PEAD e respectivas soldaduras (efectuadas por termofusão), expostas às condições atmosféricas, em diferentes aterros multimunicipais de resíduos sólidos urbanos portugueses, durante 10 anos. O objectivo deste trabalho foi estudar a evolução das propriedades mecânicas das soldaduras, bem como das propriedades físicas, mecânicas e de “endurance” das geomembranas expostas aos agentes atmosféricos. Este estudo vem dar continuidade a um programa de investigação em curso no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, desde 1999, o qual envolve também as empresas concessionárias dos aterros de resíduos.

De uma forma geral, verificou-se que, tanto as propriedades mecânicas das soldaduras, como as propriedades físicas, mecânicas e de “endurance” das geomembranas propriamente ditas, não foram significativamente afectadas pela exposição aos agentes atmosféricos durante 10 anos. Estes resultados sugerem que a quantidade de antioxidantes consumidos ainda não atingiu a Fase III, caracterizada pela degradação das propriedades das geomembranas de PEAD.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento concedido no âmbito do Projecto PTDC/AAC-AMB/102846/2008. Agradece-se igualmente às empresas concessionárias dos aterros multimunicipais de RSU portugueses o apoio concedido.

REFERÊNCIAS

- Barroso, M.C.P. & Lopes, M.G.D.A (2008). *Plano de Garantia de Qualidade da Instalação dos Geossintéticos (Plano GQIG) em Aterros de Resíduos*. Informação Técnica do LNEC, ITG 27.
- Barroso, M.C.P.; Brazão, C. e 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 Geotecnia*, Aveiro, Portugal, pp. 305-316;
- GRI-GM13 (1997). Standard Specification for Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes. Revision 9: June 1, 2009. Geosynthetic Research Institute, Folsom, Pennsylvania, USA.
- GRI-GM19 (2002). Standard Specification for Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes. Revision 2: January 28, 2005. Geosynthetic Research Institute, Folsom, Pennsylvania, USA.
- Halse, Y., Wiertz, J., Rigo, J.M. e Cazzuffi, D.A. (1991). Chemical Identification Methods Used to Characterize Polymeric Geomembranes. RILEM: Report of Technical Committee 103, pp. 316-335.
- Haxo, H. e Nelson, N. (1984). Factors in the Durability of Polymeric Membrane Liners. *International Conference on Geomembranes*, Dever, USA, pp. 287-292
- Hsuan, Y.G. e Koerner, R.K. (1998). Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylene Geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 124 (6), pp. 532-541
- Koerner R. M. (1998). *Designing with Geosynthetics*, 4th Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Lodi, P.C. (2003). Aspectos de Degradação de Geomembranas Poliméricas de PEAD e PVC. *Tese para obtenção do grau de Doutor em Geotecnia*, Universidade de S. Paulo, S. Paulo, Brasil, 284 p.
- Lopes, M.G.D.A. e Barroso, M.C.P. (2004). Mechanical Performance of HDPE Geomembranes Seams after Sunlight Exposure. *Proceedings of EuroGeo 3*, Munich, Germany, Vol. 1, pp. 425-428.
- Peggs I. D. (1990). Destructive Testing of Polyethylene Geomembrane Seams: Various Methods to Evaluate Seams Strength. *Geotextiles and Geomembranes* 9 (4), pp 405-414.
- Peggs I. D. e Little D. (1985). The Effectiveness of peel and shear tests in evaluating HPDE geomembrane seams. *2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes*, Alberta, Canada, pp 141-146.
- Rowe, R.K., Rimal, S. e Sangam, H.P. (2009). Ageing of HDPE Geomembrane Exposed to Air, Water and Leachate at Different Temperatures. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, pp 137-151.
- Rowe, R.K.; Sangam, H.P. e Lake, C.B. (2003). Evaluation of an HDPE Geomembrane after 14 Years as a Leachate Lagoon Liner. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 536-550.