

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS SOLDADURAS POR FUSÃO DE GEOMEMBRANAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE EXPOSTAS AOS RAIOS SOLARES

EFFECTS OF SUNLIGHT EXPOSURE ON HIGH DENSITY POLYETHYLENE GEOMEMBRANE SEAMS

Barroso, Madalena, *LNEC, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*

Brazão, Carla, *Somague, Madeira, Portugal*

Lopes, M^a da Graça A., *ISEL, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.ipl.pt*

RESUMO

Com o objectivo de estudar a evolução das propriedades mecânicas das soldaduras por fusão de geomembranas de polietileno de alta densidade expostas aos raios solares, está em curso um programa de investigação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, com o apoio das empresas concessionárias dos aterros multimunicipais de RSU portugueses. No presente artigo, apresenta-se e discute-se o trabalho experimental realizado, nomeadamente os primeiros resultados dos ensaios de corte e de arranque realizados sobre amostras expostas aos raios solares nos diferentes aterros de resíduos de norte a sul do país, cobertas ou não com geotêxtil, e sobre amostras não expostas. A análise dos resultados obtidos mostrou que, para o período de exposição decorrido (inferior a cinco anos), a resistência ao corte e ao arranque das soldaduras de geomembrana não foi significativamente afectada pela exposição aos raios solares.

ABSTRACT

A research programme is under way at *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, with a view to study the evolution of the mechanical properties of 2 mm-thick high density polyethylene geomembrane seams, made using the thermal-hot dual wedge method, exposed to sunlight. The programme has been carried out with the support of the Portuguese Multimunicipal Solid Waste (MSW) landfills. This paper presents and discusses the preliminary results obtained, namely the results from the peel and shear tests, performed on specimens taken from exposed seam samples, with and without a cover geotextile, and from unexposed samples. The exposed samples are in the MSW Portuguese landfills, from north to south. For the elapsed time of sunlight exposition (less than five years), the peel and shear strength of the seams has not been affected significantly by the sunlight.

1. INTRODUÇÃO

As geomembranas são um elemento essencial nos sistemas de confinamento de aterros de resíduos sólidos urbanos. A utilização destes materiais em aterros de resíduos é relativamente recente e, como tal, a sua durabilidade permanece ainda pouco conhecida, nomeadamente no que diz respeito aos efeitos da exposição solar.

Foram realizados vários estudos experimentais com o objectivo de caracterizar o comportamento das geomembranas a longo prazo ([11], [12], [13], [1], [2], [4]), mas estes estudos centraram-se sobretudo nas geomembranas propriamente ditas e não nas zonas de união entre painéis adjacentes (soldaduras). No entanto, devido às solicitações mecânicas e térmicas a

que são sujeitas durante o processo de soldadura, estas são zonas vulneráveis e, como tal, devem ser objecto de controlo no que diz respeito à resistência mecânica e à estanqueidade.

A fim de estudar a evolução das propriedades mecânicas das soldaduras por fusão de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) expostas aos raios solares, está em curso um programa de investigação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o apoio das empresas concessionárias dos aterros multimunicipais de RSU portugueses.

Neste artigo, apresenta-se o trabalho experimental realizado para avaliar os efeitos da exposição solar na resistência das soldaduras e os primeiros resultados obtidos para as amostras expostas desde 1998 nos aterros multimunicipais de resíduos de todo o país, de Valença ao Algarve.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 Amostras ensaiadas

A influência da exposição solar sobre soldaduras por fusão de geomembrana de PEAD com 2 mm de espessura (dupla soldadura), foi estudada mediante a realização de ensaios destrutivos (corte e arranque) sobre amostras expostas aos raios solares e sobre amostras não expostas. Para o efeito, nos diferentes aterros multimunicipais de RSU (Figura 1), preparou-se uma amostra com uma junta (dupla soldadura por fusão) a meio, utilizando a mesma geomembrana aplicada na obra.



Legenda

1. RSU de Valença (VALORMINHO)
2. RSU de Viana do Castelo (RESULIMA)
3. RSU de Vila Nova de Gaia (SULDOURO)
4. RSU de Aveiro (ERSUC)
5. RSU da Figueira da Foz (ERSUC)
6. RSU de Leiria (VALORLIS)
7. RSU do Barlavento (ALGAR)
8. RSU do Sotavento (ALGAR)

Figura 1 – Localização dos aterros multimunicipais de RSU

As amostras foram divididas em três partes, tal com esquematizado na Figura 2. Uma parte foi enviada ao LNEC (não exposta) e as outras duas permaneceram no respectivo aterro expostas às condições climáticas do local. Destas, uma foi coberta com geotêxtil (conforme se encontra no aterro) e a outra foi exposta directamente aos raios solares (conforme se encontra na lagoa de lixiviados). As amostras encontram-se expostas num talude de fácil acesso (fora do aterro), ou na cobertura de edifícios, bem fixas, de modo a que o vento não as danifique.

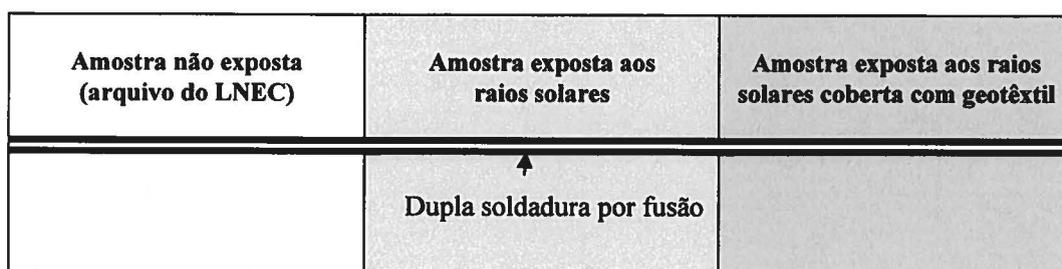


Figura 2 – Esquema de preparação das amostras

As amostras expostas são periodicamente colhidas e, sobre as mesmas, são realizados ensaios para determinação da resistência mecânica das soldaduras. As amostras não expostas são igualmente ensaiadas para efeitos de comparação. No Quadro 1 apresenta-se o tipo de exposição das amostras em cada aterro (com e sem geotêxtil de cobertura), assim como a data de colocação e colheita das mesmas.

Quadro 1 – Forma de exposição solar das amostras nos diferentes aterros de resíduos

Aterro de RSU	Forma de exposição solar <i>in situ</i>	Data de colocação	Data das colheitas
Barlavento (ALGAR) *	Sem geotêxtil	Fev-98	Jul-99
			Set-00
			Out-02
Leiria (VALORLIS)	Sem geotêxtil	Jan-99	Jan-00
	Com geotêxtil		Set-00
			Out-02
Aveiro (ERSUC)	Sem geotêxtil	Nov-98	Set-00
	Com geotêxtil		Out-02
F. Foz (ERSUC)	Com geotêxtil	Set-98	Out-99
			Set-00
			Out-02
V. N. Gaia (SULDOURO)	Com geotêxtil	Fev-99	Jan-00
			Set-00
			Out-02
Sotavento (ALGAR)	Sem geotêxtil	Nov-99	Set-00
	Com geotêxtil		Out-02
Valença (VALORMINHO)	Sem geotêxtil	Jun-99	Set-00
	Com geotêxtil		Out-02
V. Castelo (RESULIMA)	Sem geotêxtil	Dez-98	Jan-00
			Set-00
			Out-02

* Não existe amostra não exposta no LNEC.

As principais características e localização das geomembranas utilizadas neste estudo apresentam-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Principais características e localização das geomembranas utilizadas

Geomembrana (PEAD)	μ (g/m ²) EN 965	Espessura (mm) EN 964-1	Densidade (g/cm ³) ISO 1183	Resistência à tração (cedência) (N/mm ²)	Extensão na cedência (%)	Localização (aterros)
A	1900	2,0		16,0 (DIN 53455)	9 (DIN 53455)	5, 7, 8
B	1920	2,0	0,94	16,5 (ISO 527)	12 (ISO 527)	1, 3, 4, 6
C	2000	2,0	0,94	17,0 (DIN 53455)	11 (DIN 53455)	2

2.2 - Metodologia de trabalho

A resistência mecânica das soldaduras foi determinada através de ensaios destrutivos (Figura 3): ensaios de arranque (*peel test*) e ensaios de corte (*shear test*), segundo a Norma ASTM D4437 [1].



Figura 3 – Esquema dos ensaios destrutivos

Estes ensaios foram realizados com um tensiómetro existente no LNEC, tipo Examo 300F, o qual se apresenta uma fotografia na Figura 4.

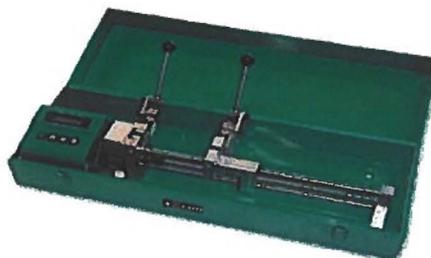


Figura 4 – Tensiómetro portátil utilizado na realização dos ensaios de corte e de arranque

As condições operatórias de realização dos ensaios foram as seguintes:

- largura dos provetes: 25,4mm;
- velocidade de deformação: 51mm/min;
- distância entre garras: 25,4mm no ensaio de arranque e 101,2mm no ensaio de corte; comprimento do provete: 152,4mm;
- ajuste das garras à espessura da geomembrana;
- temperatura: $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- número de provetes ensaiados: 3 no ensaio de arranque e 3 no ensaio de corte.

De notar que no presente estudo, o número de provetes ensaiados foi, apenas, três e não cinco, conforme indicado na norma, porque o tamanho disponível das amostras tornaria impossível a realização de ensaios nos próximos anos.

Com o objectivo de verificar se as amostras em estudo eram representativas, *i.e.*, se apresentavam qualidade semelhante às soldaduras dos aterros, as mesmas foram analisadas com base nos critérios de aceitação geralmente utilizados em obra para as resistências, de acordo com as recomendações da USEPA [14]. Para mais detalhes sobre critérios de aceitação das soldaduras ver, por exemplo, [5], [7], [6], [9], [10], [8].

Assim, considerou-se que os valores mínimos aceitáveis eram, respectivamente 23 kN/m para a resistência ao arranque e 30 kN/m para a resistência ao corte.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Evolução da resistência mecânica das soldaduras de geomembrana em amostras expostas aos raios solares

3.1.1 Soldaduras de geomembrana expostas directamente aos raios solares

3.1.1.1 Ensaio de corte

A Figura 5 mostra os valores médios da resistência ao corte obtidos para as amostras expostas nos diversos aterros de RSU ao longo do tempo. Pode observar-se que as soldaduras expostas sem geotêxtil apresentam uma evolução semelhante. A variação máxima deste parâmetro foi pouco significativa, situando-se em 0,9 kN/m. Verifica-se, também, que nestes ensaios todos os valores da resistência ao corte foram superiores a 30 kN/m.

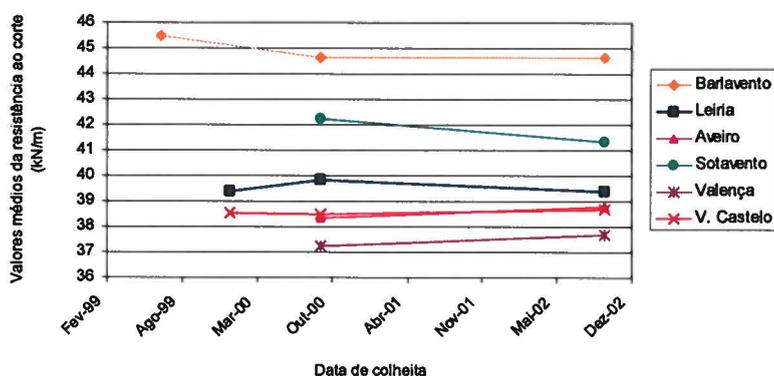


Figura 5 – Evolução da resistência ao corte para as amostras expostas aos raios solares

3.1.1.2 Ensaio de arranque

A Figura 6 ilustra a evolução da resistência média ao arranque sobre as amostras expostas nos diversos aterros de RSU. Pode verificar-se que as mesmas apresentam uma evolução semelhante, à excepção da amostra exposta no aterro de Leiria, que, em 2000, apresenta uma resistência ao arranque inferior. Todavia, a observação visual efectuada aos provetes colhidos nessa data sugere que este resultado pode estar relacionado com alguma anomalia ocorrida durante a execução da soldadura. Observa-se ainda, que nestes ensaios, todos os provetes tiveram uma resistência ao arranque superior a 23 kN/m.

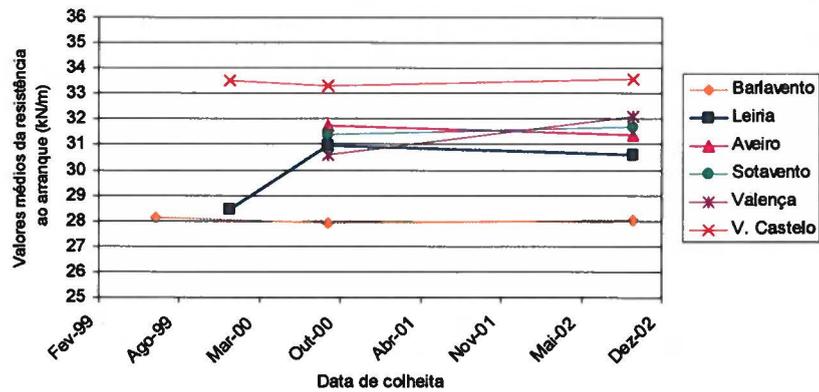


Figura 6 – Evolução da resistência ao arranque para as amostras expostas aos raios solares

3.1.2 Soldaduras de geomembrana expostas aos raios solares cobertas com geotêxtil

3.1.2.1 Ensaio de corte

Na Figura 7 apresentam-se os valores médios da resistência ao corte obtidos para as amostras expostas aos raios solares cobertas com geotêxtil ao longo do tempo, nos diversos aterros de RSU. Pode observar-se que as amostras têm uma evolução idêntica. A variação máxima deste parâmetro foi pouco significativa, à exceção das amostras colhidas no aterro da F. da Foz, onde este parâmetro apresentou uma variação de 3 kN/m. Nas restantes amostras a variação foi inferior a 1 kN/m. Verifica-se que os valores da resistência ao corte foram todos superiores a 30 kN/m nestes ensaios.

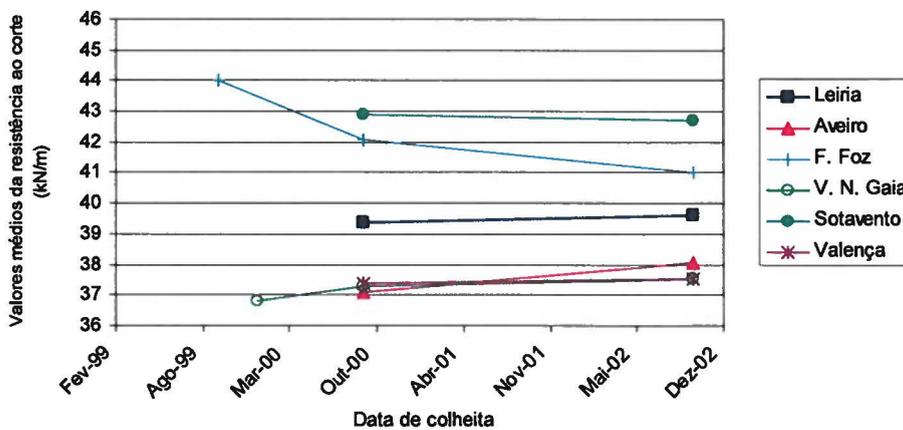


Figura 7 – Evolução da resistência ao corte para as amostras expostas aos raios solares cobertas com geotêxtil

3.1.2.2 Ensaio de arranque

A Figura 8 mostra a evolução da resistência ao arranque sobre as amostras expostas aos raios solares cobertas com geotêxtil ao longo do tempo, nos diversos aterros de RSU. Pode observar-se que os resultados deste parâmetro apresentam, em anos consecutivos, uma variação pouco significativa, à exceção das amostras colhidas nos aterros da F. da Foz e de V. Nova de Gaia.

Porém, no caso da amostra exposta no aterro da F. da Foz, suspeita-se que ocorreu alguma anomalia ocorrida durante a operação de soldar, tal como, por exemplo, ajuste inadequado do equipamento de soldar (pressão, velocidade ou temperatura) às condições atmosféricas existentes durante a preparação da amostra. Esta hipótese é reforçada pelos resultados do ensaio de corte (ver Figura 7), onde a evolução da resistência ao corte das amostras colhidas neste aterro apresentou uma variação superior às restantes amostras. De acordo com a observação visual efectuada aos provetes, o mesmo comentário pode ser feito para a amostra de V.N. de Gaia. Por último, refira-se que nestes ensaios, todos os provetes apresentam uma resistência ao arranque superior a 23 kN/m.

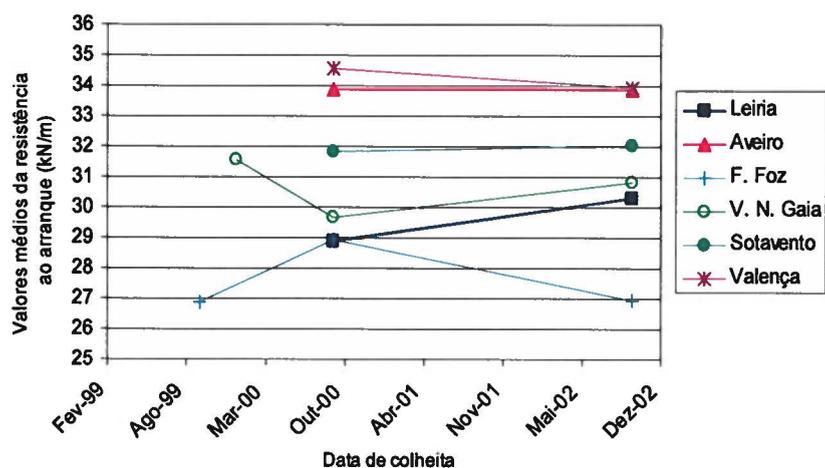


Figura 8 – Evolução da resistência ao arranque para as amostras expostas aos raios solares cobertas com geotêxtil

3.2 Evolução da resistência mecânica das soldaduras não expostas aos raios solares

3.2.1 Ensaio de corte

Na Figura 9 apresenta-se a evolução dos valores médios da resistência ao corte obtidos para as amostras não expostas aos raios solares. Verifica-se que, este parâmetro evolui de forma semelhante nas diferentes amostras. Os valores obtidos em anos sucessivos apresentam uma variação pouco significativa, à excepção das amostras correspondentes aos aterros da F. Foz e do Sotavento, onde ocorreram variações de 4,2kN/m e 2,6kN/m, respectivamente. Note-se, no entanto, que o tempo decorrido desde a execução das amostras é diferente, pelo que não faz sentido fazer comparações em termos de valores absolutos, mas sim em termos de tendência, sendo esta semelhante nos dois casos. Reitera-se o comentário efectuada no ponto 3.1.2.2 sobre a qualidade da soldadura da amostra preparada na F. da Foz, a qual se julga ter sido influenciada por uma anomalia ocorrida durante a operação de soldar. Este comentário é igualmente válido para amostra não exposta do aterro do Sotavento, de acordo com a observação visual realizada à mesma. Nas restantes amostras, a variação máxima da resistência ao corte foi de 1,0 kN/m. Observa-se igualmente que a mesma foi sempre superior a 30 kN/m.

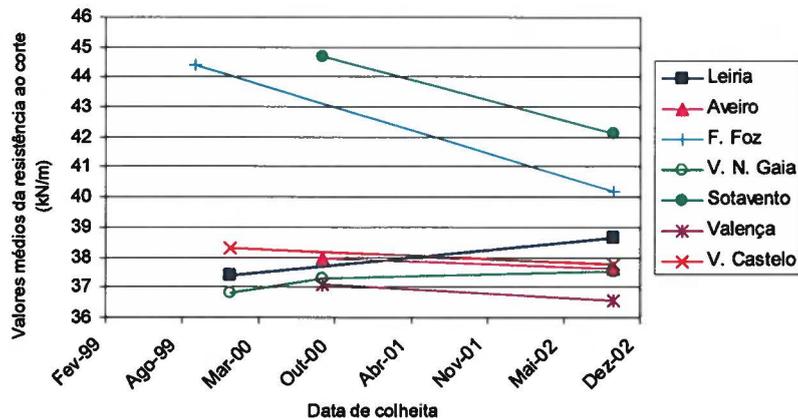


Figura 9 – Evolução da resistência ao corte para as amostras não expostas

3.2.2 Ensaio de arranque

A Figura 10 mostra a evolução da resistência ao arranque sobre as amostras não expostas aos raios solares ao longo do tempo. Pode verificar-se que, de um modo geral, a evolução deste parâmetro é semelhante nas diferentes amostras, aumentando ligeiramente ao longo do tempo, embora, mais acentuada no caso do aterro do Sotavento, onde se registou um incremento de 5,3 kN/m. De referir ainda o caso da amostra do aterro da F. da Foz, nas quais esta propriedade se manteve praticamente constante. Estes resultados confirmam as suspeitas anteriormente expressas relativamente à possibilidade da qualidade das soldaduras nestes aterros ter sido afectada por alguma anomalia ocorrida aquando da preparação das amostras. À semelhança das amostras expostas, todos os provetes têm resistência ao arranque superior a 23 kN/m.

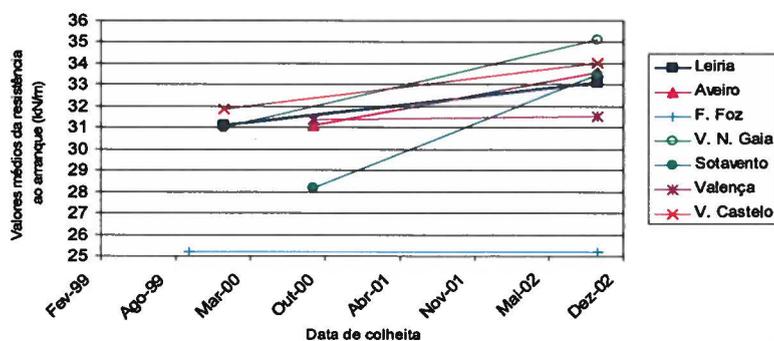


Figura 10 – Evolução da resistência ao arranque para as amostras não expostas aos raios solares

3.3 Comparação entre amostras expostas aos raios solares cobertas ou não com geotêxtil

3.3.1 Ensaio de corte

A Figura 11 mostra a evolução da resistência ao corte sobre as amostras expostas aos raios solares cobertas ou não com geotêxtil. Como pode observar-se, os resultados não apresentam uma tendência comum (para alguns aterros é a amostra exposta com geotêxtil que apresenta maior resistência, enquanto para outros é o contrário), sugerindo que, para o período de exposição decorrido, a presença do geotêxtil sobre a geomembrana não influenciou os valores da resistência ao corte das soldaduras.

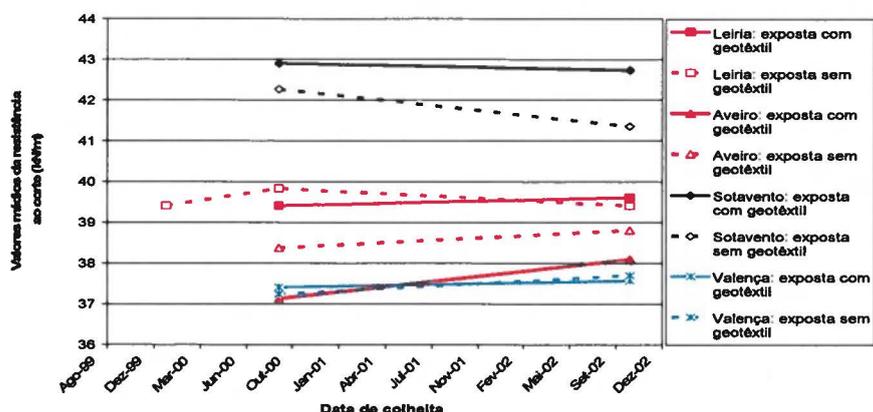


Figura 11 – Comparação entre as resistências ao corte das amostras expostas aos raios solares cobertas com e sem geotêxtil

3.3.2 Ensaio de arranque

A Figura 12 apresenta a evolução da resistência ao arranque para as amostras expostas aos raios solares cobertas ou não com geotêxtil nos diferentes aterros. À semelhança do ensaio de corte, verificou-se que os resultados não apresentam uma tendência geral, sugerindo que, para o tempo de exposição indicado, a presença do geotêxtil sobre a geomembrana não influenciou os valores da resistência ao arranque das soldaduras.

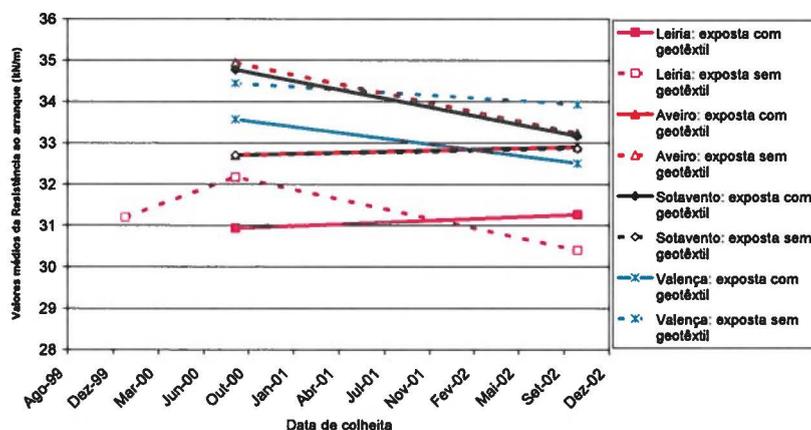


Figura 12 – Comparação entre as resistências ao arranque das amostras expostas com e sem geotêxtil de cobertura

3.4 Comparação entre amostras expostas aos raios solares e amostras não expostas

Uma vez que, para as amostras expostas aos raios solares, se observou que a cobertura com geotêxtil não influenciou a resistência mecânica das soldaduras, nas secções seguintes comparam-se apenas os resultados entre as amostras expostas sem geotêxtil e as amostras não expostas.

3.4.1 Ensaio de corte

Na Figura 13 compara-se a evolução da resistência ao corte sobre as amostras expostas aos raios solares sem geotêxtil de cobertura e as amostras não expostas. Observa-se que, uma vez mais, os resultados não apresentam uma tendência geral, sugerindo que, para o período de exposição decorrido, a exposição solar não influenciou os valores da resistência ao corte.

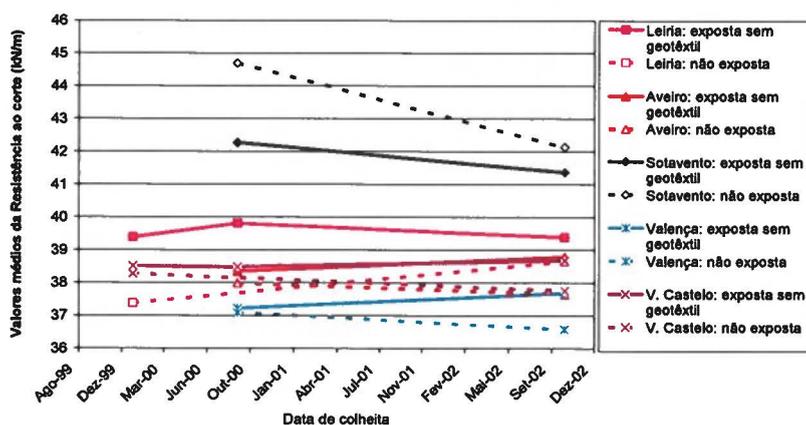


Figura 13 – Comparação entre as resistências ao corte das amostras expostas e não expostas

3.4.2 Ensaio de arranque

A evolução da resistência ao arranque das amostras expostas aos raios solares sem geotêxtil de cobertura e não expostas é comparada na Figura 14. Tal como pode observar-se na referida figura, os resultados não apresentam uma tendência única, sugerindo que, para o período de exposição em questão, a exposição solar não influenciou a resistência ao arranque das soldaduras.

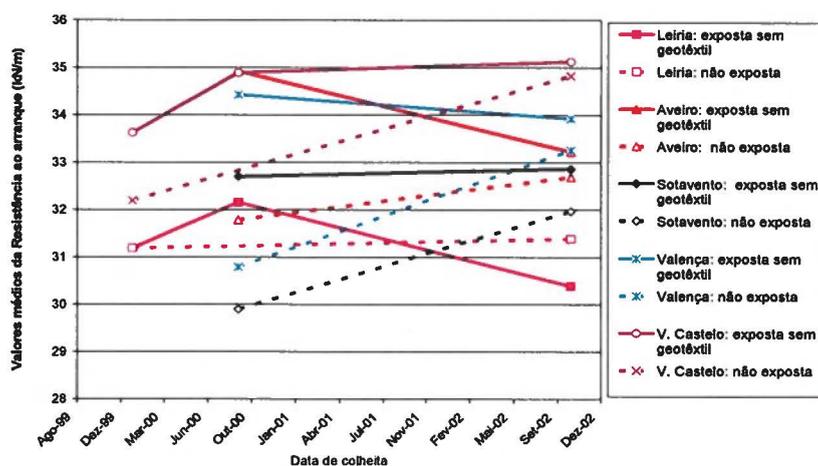


Figura 14 – Comparação entre as resistências ao arranque das amostras expostas e não expostas

3.5 Comparação com os resultados obtidos por Hsuan *et al.*, 1991

Hsuan *et al.* [4] realizaram um estudo para avaliar os efeitos da exposição solar nas geomembranas de PEAD. Para o efeito, efectuaram ensaios laboratoriais sobre amostras expostas numa lagoa de lixiviados, durante sete anos, em provetes com e sem soldaduras. As amostras foram recolhidas em quatro locais da lagoa, os quais correspondiam a diferentes níveis de exposição, desde permanentemente expostas aos raios solares (localizadas no topo de talude) até às não expostas (na base da lagoa, cobertas com lixiviado). Os resultados obtidos mostraram que a resistência ao corte e a resistência ao arranque das soldaduras não foram significativamente afectadas pela exposição solar das amostras. A resistência à tracção das amostras sem soldadura não foi igualmente afectada pela exposição solar.

Um estudo similar conduzido por Rowe & Sangam [11] com uma geomembrana exposta durante catorze anos numa lagoa de lixiviados mostrou também que, independentemente da localização das amostras (continuamente expostas no talude, ou não expostas na base da lagoa), os valores da resistência à tracção da geomembrana (sem soldadura) foram da mesma ordem de grandeza, corroborando os resultados anteriormente obtidos por Hsuan *et al.* [4].

Embora o tempo de exposição seja diferente, sendo Portugal um país com elevado número de horas de sol por ano, considera-se que os resultados relatados no presente estudo são consistentes com os resultados obtidos por Hsuan *et al.* [4].

4. CONCLUSÕES

As geomembranas de polietileno de alta densidade utilizadas na impermeabilização dos aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) podem ficar expostas durante anos aos raios solares, os quais podem influenciar o desempenho das mesmas a longo-prazo. Com este trabalho, pretendeu-se estudar a influência que a exposição aos raios solares tem na resistência mecânica das soldaduras por fusão de geomembranas de PEAD.

Neste artigo, apresentaram-se os resultados preliminares dos ensaios destrutivos, de corte e arranque, em amostras com soldaduras por fusão (geomembranas de PEAD, com 2 mm de espessura), expostas durante os primeiros cinco anos aos raios solares (com geotêxtil e sem geotêxtil de cobertura). Os ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D 4437 [1], utilizando o tensiómetro *Examo 300F* existente no LNEC.

Verificou-se que, durante os primeiros cinco anos, a variação da resistência ao corte e ao arranque das soldaduras expostas aos raios solares, foi pouco significativa, tanto para as amostras expostas sem geotêxtil de cobertura, como para as cobertas com geotêxtil.

Relativamente às amostras não expostas, à excepção das correspondentes aos aterros da Figueira da Foz e do Sotavento, observou-se que a resistência ao corte apresentou uma variação reduzida em anos sucessivos; quanto à resistência ao arranque, apenas no aterro do Sotavento se observou uma variação significativa, aumentando 5,3 kN/m; as variações mais significativas de resistência verificadas para as amostras dos aterros da Figueira da Foz e do Sotavento foram, porém, atribuídas à qualidade das soldaduras.

Resumindo, as propriedades mecânicas das soldaduras não foram significativamente afectadas pela exposição solar durante o período de tempo em estudo, apresentando, de um modo geral, variações inferiores a 2 kN/m, no ensaio de corte, e de 5 kN/m, no ensaio de arranque. Estes resultados podem justificar-se pelo facto de o tempo de exposição das soldaduras de

geomembrana aos raios solares ser reduzido (inferior ou igual a 5 anos). Estes resultados são consistentes com os resultados apresentados por Hsuan *et al.* [4].

O trabalho aqui relatado sobre o efeito dos raios solares na resistência mecânica das soldaduras de geomembrana de PEAD mantém-se em curso, durante a vida útil dos aterros.

5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se às empresas concessionárias dos aterros multimunicipais de RSU portugueses o apoio prestado. Agradece-se, igualmente, ao técnico especialista Augusto Lopes de Carvalho (LNEC) a colheita das amostras e a realização dos ensaios.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTM D 4437 – Determining the integrity of field seams used in joining flexible polymeric sheet geomembranes.
- [2] Cazzuffi, D., Fede, L., Montanelli, F. E. & Rimoldi, P., Outdoor and UV-B Laboratory Weathering Resistance of Geosynthetics, Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapura (1994), pp.1195-1198.
- [3] Cazzuffi, D., Fede, L., Villa, C., Montanelli, F. E. & Rimoldi, P., The Assessment of Effects of Natural and Lab Weathering Exposure of Geosynthetics, Proceedings of Sardinia 95, 4th Landfill Symposium (1995), pp.387-396.
- [4] Hsuan, Y. G., Lord Jr., A.E. & Koerner, R.M., Effects of Outdoor Exposure on a High Density Polyethylene Geomembrane, Proceedings of Geosynthetics'91 Conference, Atlanta, USA (1991), pp.287-302.
- [5] NSF 54, Flexible Membrane Liners, National Sanitation Foundation, Ann Arbor, Michigan, USA (1993).
- [6] Peggs, I. D., Testing Program to Assure the Durability of Geomembranes, Landfill of Waste: Barriers, Edited by T.H. Christensen, R. Cossu & R. Stegmann, Chapman & Hall, London, UK (1994), pp.413-429.
- [7] Peggs, I. D. & Little, D., The Effectiveness of Peel and Shear Tests in Evaluating HPDE Geomembrane Seams, Proceedings of Second Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes (1987), pp.141-146.
- [8] Peggs, I. D. & Rollin, A., Seams in HPDE Geomembranes: The Quality Target, Proceedings of 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapura (1994), pp.949-952.
- [9] Peggs, I. D., Destructive Testing of Polyethylene Geomembrane Seams, Proceedings of the 3rd GRI Seminar – on the Topic of - The Testing of Geosynthetics (1989), pp.116-125.
- [10] Peggs, I. D., Destructive Testing of Polyethylene Geomembrane Seams: Various Methods to Evaluate Seams Strength, Geotextile and Geomembranes, No. 9 (1990), pp.405-414.
- [11] Rowe, K. R. & Sangam, H.P., Durability of HDPE Geomembranes, Geotextile and Geomembranes, No. 20 (2002), pp.77-95.
- [12] Sangam, H.P. & Rowe, R.K., Permeation of Organic Pollutants Through a 14 Year Old Field-Exhumed HDPE Geomembrane, Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France (2002), pp.531-534.
- [13] Sangam, H.P., Rowe, R.K., Mlynarek, J. & Sarazim, P., Natural Weathering of a 14 Year Pre-Aged Geomembrane, Proceedings of Geosynthetics Conference 2001, Portland, Oregon, USA (2001), pp.149-162.
- [14] USEPA, Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities, EPA/600/R-93/182, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH 45268 (1993).