

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO CONTROLO DAS SOLDADURAS DE GEOMEMBRANAS DE PVC

## Influence of temperature on the peel strength of the PVC geomembrane seams

Pedro Sanfona<sup>a</sup>, Madalena Barroso<sup>b</sup>, Simona Fontul<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

<sup>b</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

**RESUMO** – As geomembranas de policloreto de vinilo (PVC) são as mais utilizadas em sistemas de impermeabilização de barragens. O sucesso destes sistemas depende da qualidade com que as soldaduras das geomembranas são executadas, as quais devem ser avaliadas no que se refere à estanqueidade e à resistência mecânica, a última geralmente através de ensaios de arranque e de corte. Neste trabalho, estudou-se a influência da temperatura na resistência mecânica, em termos de força de arranque e de tipo de rotura das soldaduras. Foram usadas três geomembranas, com diferentes espessuras e tipos de soldadura. Realizaram-se ensaios laboratoriais segundo a norma ASTM D 6392, a 12 temperaturas, variando entre os 5°C e os 41°C. Os resultados obtidos indicaram que a força de arranque não variou significativamente com a temperatura e que os tipos de rotura definidos na norma não eram aplicáveis, no caso de duas das geomembranas estudadas.

**SYNOPSIS** – The PVC geomembranes are the most common used for dams. The success of a lining system with geomembranes depends on the quality of the seams. The seams have to be evaluated in terms of continuity and mechanical strength, the latter being assessed by peel and shear tests. In this work, the influence of the temperature on the peel strength of the PVC geomembrane seams is studied. Three geomembranes with different thickness and different type of seams were evaluated by peel tests according to ASTM D 6392 standard, at temperatures ranging from 5°C to 41°C. Results obtained show that the peel strength of the PVC geomembrane seams did not change significantly with temperature, suggesting it has a small influence on the strength value. The locus-of-break codes of the seams, according the ASTM standard, were also studied. The type of ruptures obtained in this study are not foreseen in standard for two geomembranes.

**Palavras Chave** – geomembranas de PVC, soldaduras, força de arranque, temperatura.

**Keywords** – PVC geomembranes, seams, peel strength, temperature.

## 1 – INTRODUÇÃO

As alterações climáticas, cada vez mais evidentes, alertam para a necessidade do uso sustentável do recurso água, bem como do seu armazenamento. Este recurso encontra-se cada vez mais próximo do seu limite de exploração, constituindo-se as barragens como uma solução de engenharia para o seu armazenamento. A implementação, nestas estruturas, de sistemas de impermeabilização constituídos por um conjunto de geossintéticos, cada um com uma função específica, dos quais se destacam as geomembranas e a sua função de barreira, tem ganho bastante popularidade (Sanfona, 2018).

---

E-mails: p.sanfona@campus.fct.unl.pt (P. Sanfona), mbarroso@lnec.pt (M. Barroso), simona@lnec.pt (S. Fontul)

As geomembranas de PVC (policloreto de vinilo) têm sido as mais aplicadas em barragens (ICOLD, 2010). As soldaduras são um dos aspetos mais importantes para o bom desempenho de um sistema de impermeabilização com geomembranas. A sua qualidade deve ser avaliada em termos, quer de estanqueidade, através de ensaios não destrutivos, quer de resistência mecânica, através de ensaios destrutivos de corte e de arranque. Os ensaios destrutivos são geralmente realizados segundo a norma ASTM D 6392 (2018), à temperatura de 23°C(±2°C). No entanto, esta temperatura, por vezes, em campo, não é possível de assegurar, levantando questões acerca da aceitação/rejeição das soldaduras.

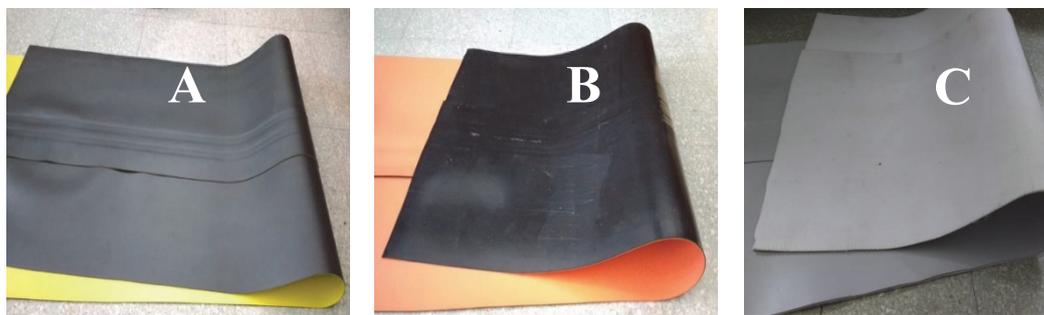
Com o objetivo de estudar a influência da temperatura na resistência mecânica das soldaduras, realizaram-se ensaios de arranque sobre três de geomembranas de PVC, com diferentes espessuras e tipos de soldadura. Os ensaios foram efetuados segundo a norma ASTM D 6392, a 12 diferentes temperaturas, variando entre os 5°C e os 41°C. Os resultados foram analisados em termos de força de arranque e de tipo de rotura das soldaduras, sendo apresentados na presente comunicação.

## 2 – TRABALHO EXPERIMENTAL

### 2.1 – Materiais

Foram utilizadas três geomembranas, com espessuras diferentes (1,5, 2,0 e 3,0 mm), designadas por geomembranas A, B e C (Figura 1). De cada geomembrana, foi preparada, pelo fabricante, uma amostra de soldadura por termofusão, através da utilização de ar quente. As geomembranas A e B apresentavam soldaduras duplas (com canal de ar), ao contrário da geomembrana C que apresentava soldadura simples (sem canal de ar).

As geomembranas A e B são constituídas por duas camadas (uma colorida e a outra de cor preta), enquanto a geomembrana C é homogénea.



**Fig. 1** – Geomembranas estudadas.

As características das geomembranas estudadas, segundo a ficha técnica disponibilizada pelos fabricantes, são apresentadas no Quadro 1.

### 2.2 – Método

De cada amostra de geomembrana, foram cortados provetes, com as dimensões de 25 mm de largura e 150 mm de comprimento, com a soldadura localizada a meio (Figura 2). Estes foram colocados em ambientes acondicionados a 12 temperaturas diferentes, variando entre 5°C e 41°C, nomeadamente, 5, 7, 10, 14, 16, 20, 23, 27, 30, 33, 37 e 41°C, durante 40 horas.

**Quadro 1** – Características das geomembranas usadas, de acordo com as fichas técnicas.

Propriedades	Geomembrana A	Geomembrana B	Geomembrana C
Cor (superior/inferior)	Amarela/Preta	Laranja/Preta	Cinzenta
Espessura (mm)	1,5 (EN 1849-2)	2,0 (EN 1849-2)	3,0 (EN 1849-2)
Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	1950 (EN 1849-2)	2740 (EN 1849-2)	-
Massa volúmica (g/m <sup>3</sup> )	-	-	1,25 (EN ISO 1183-1)
Resistência à tração na rotura (kN/m)	22,5 (EN 12311-2)	30 (EN ISO 527-1 e 3, provete tipo 5, 100mm/min)	30 (EN ISO 527-4, 100mm/min)
Extensão na rotura (%)	300 (EN 12311-2)	250 (EN ISO 527-1 e 3, provete tipo 5, 100mm/min)	250 (EN ISO 527-4, 100mm/min)
Resistência ao rasgamento (kN/m)	-	≥ 45 (ISO 34, método B, 500mm/min)	≥ 130 (ISO 34, método B, 500mm/min)
Flexibilidade a baixas temperaturas	-	S/quebras ou fissuras a -25°C (EN 495-5)	S/quebras ou fissuras a -30°C (EN495-5)

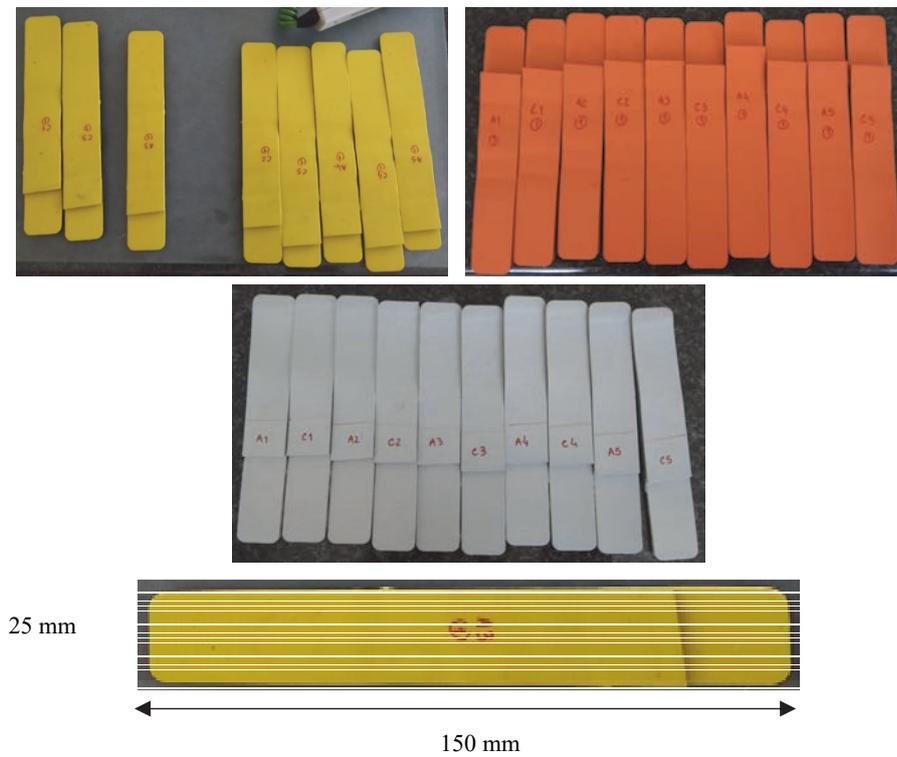
De referir que, a geomembrana C continha um geotêxtil acoplado na parte inferior, o qual se optou por retirar, de forma a que todas as amostras se encontrassem nas mesmas condições, uma metodologia já utilizada por Cazzuffi (2014).

Os ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D 6392. Embora esta norma preconize a realização de ensaios de arranque e de corte, neste trabalho apenas se procedeu à realização do ensaio de arranque, por ser o ensaio que melhor avalia a resistência da soldadura, tal como referido por Peggs (1990).

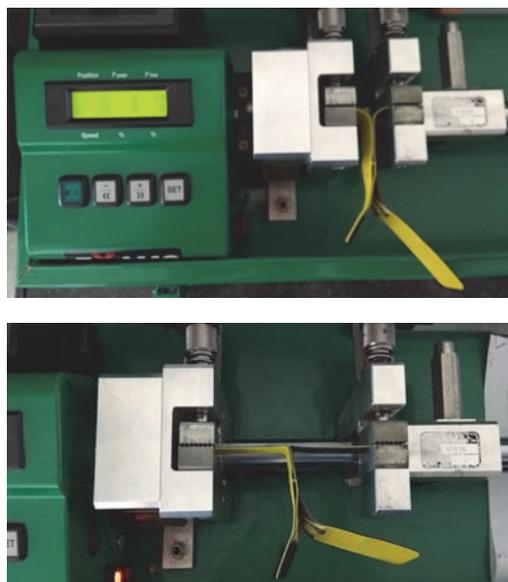
No ensaio de arranque, para cada temperatura, foram ensaiados 5 provetes num equipamento de tração – *Leister EXAMO 300F*, sendo inicialmente fixados por umas garras de 25 mm de largura, distanciadas inicialmente 25 mm. Seguidamente, os provetes foram tracionados com uma velocidade de 50 mm/min até à rotura (Figura 3).

O ensaio foi realizado para ambos os lados das soldaduras duplas das amostras das geomembranas A e B. Para a geomembrana C, por se tratar de soldadura simples apenas se realizou um ensaio em cada provete.

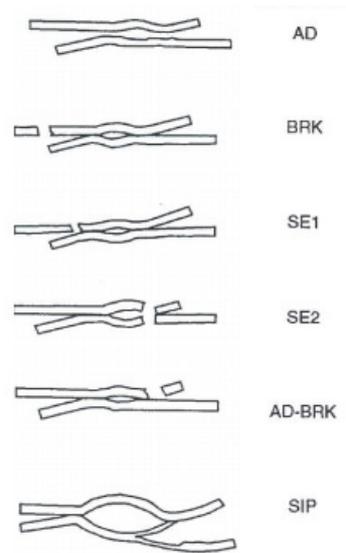
No total foram realizados cerca de 300 ensaios, nos quais, para cada provete se registou a força de arranque das soldaduras em kN/m (quociente entre a força e a largura do provete) e o tipo de rotura obtido, de acordo com a norma (Figura 4).



**Fig. 2** – Vista geral dos provetes.



**Fig. 3** – Ensaio de arranque.

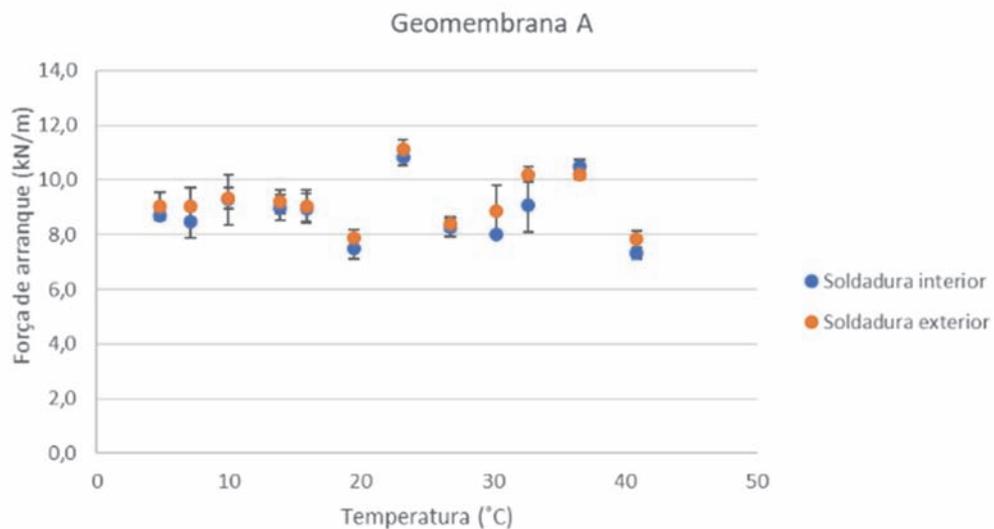


**Fig. 4** – Tipos de rotura segundo a norma ASTM D 6392.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 – Influência da temperatura na força de arranque das soldaduras

A influência da temperatura na força de arranque das soldaduras das geomembranas A, B e C, pode ser observada nas Figuras 5, 6 e 7, respetivamente, sob a forma de gráfico, o qual relaciona a temperatura (em °C) com a força de arranque (em kN/m). Para as geomembranas A e B os resultados são apresentados para as soldaduras interior e exterior, enquanto, para a geomembrana C, devido à soldadura ser simples, os resultados dizem respeito apenas a uma soldadura.



**Fig. 5** – Geomembrana A: relação entre a força de arranque das soldaduras e a temperatura.

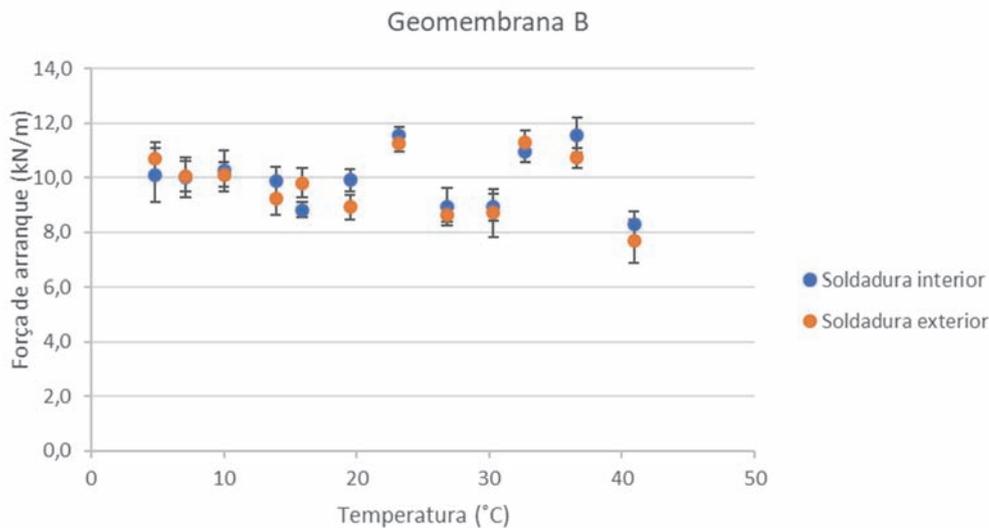


Fig. 6 – Geomembrana B: relação entre a força de arranque das soldaduras e a temperatura.

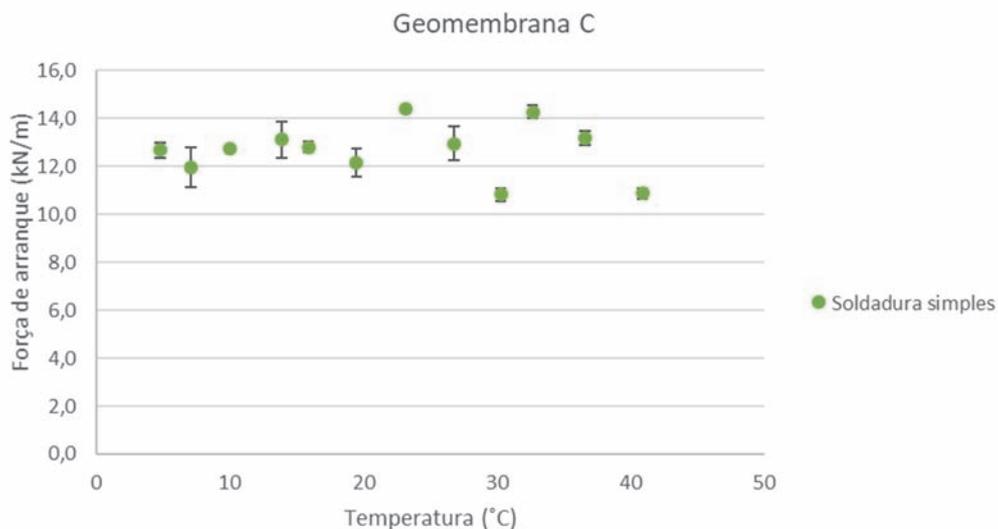


Fig. 7 – Geomembrana C: relação entre a força de arranque das soldaduras e a temperatura.

Os valores de força de arranque apresentadas correspondem à média dos cinco provetes ensaiados. Os gráficos incluem ainda as barras de erro correspondentes ao desvio-padrão.

Para as geomembranas A e B é possível constatar que os resultados obtidos para as soldaduras interior e exterior são bastante semelhantes, tendo em conta o desvio padrão calculado.

Em termos gerais, para as três geomembranas, os valores obtidos para a força de arranque das soldaduras foram relativamente constantes com a variação da temperatura, não ultrapassando uma variação de 4 kN/m, sugerindo que a temperatura não influencia significativamente a força de arranque das soldaduras. No entanto, observa-se que em todas as geomembranas, existe uma maior

dispersão dos resultados para temperaturas superiores à normalizada ( $23\pm 2^\circ\text{C}$ ), não sendo, no entanto, evidente a causa deste comportamento.

A reduzida influência da temperatura sobre a força de arranque das soldaduras de geomembranas de PVC pode estar relacionada com a estrutura molecular do polímero PVC. Segundo Jansen (2016), sob efeito da temperatura, os polímeros amorfos, como é o caso do PVC, exibem um módulo de elasticidade relativamente constante, apresentando alterações perto da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) da geomembrana ( $-20^\circ\text{C}$  a  $-25^\circ\text{C}$ ), bastante mais baixa que as temperaturas utilizadas nos ensaios realizados ( $5^\circ\text{C}$  a  $41^\circ\text{C}$ ).

### 3.2 – Análise dos tipos de rotura

A norma ASTM D 6392, para além da resistência mecânica das soldaduras, também, preconiza a análise do tipo de rotura obtido nos ensaios de arranque. Segundo esta, existem seis tipos de rotura, de acordo com a localização e a forma da rotura (Figura 4).

A classificação dos tipos de rotura, de acordo com a Figura 4, revelou-se impossível, para as geomembranas A e B, constituídas por duas camadas.

Para a geomembrana A, observou-se que a rotura ocorreu pela interface entre as duas camadas que constituem a mesma geomembrana, identificáveis com cores diferentes, amarelo e preto, e não pela soldadura propriamente dita, sugerindo que ocorreu um desligamento entre as diferentes camadas que constituem a geomembrana, tal como se pode observar na Figura 8.

Para a geomembrana B, observou-se que a rotura ocorreu pela soldadura, sem, no entanto, existir descolagem nessa zona. Como se pode observar na Figura 9, a existência de pequenos vestígios de material na zona da soldadura indica que a rotura ocorreu pelo interior das próprias geomembranas, o que sugere que a soldadura era mais resistente que a geomembrana.

Para a geomembrana C, homogênea, verificou-se que a rotura ocorreu na zona da soldadura através de descolagem parcial, como se pode observar na Figura 10. Este tipo de rotura pode classificar-se, de acordo com a norma, por AD-BRK.

O facto da geomembrana C ser homogênea e o tipo de rotura ter sido o único possível de classificar, de acordo com a referida norma, alerta para a necessidade de alargar os tipos de rotura indicados, nomeadamente para geomembranas constituídas por mais do que uma camada, como as geomembranas A e B.



**Fig. 8** – Tipo de rotura obtido para a geomembrana A.



**Fig. 9** – Tipo de rotura obtido para a geomembrana B.



**Fig. 10** – Tipo de rotura obtido para a geomembrana C.

### 3.3 – Critérios de aceitação/rejeição das soldaduras

A avaliação da qualidade das soldaduras requer que os resultados obtidos sejam posteriormente comparados com valores definidos nas especificações de projeto. Em termos gerais, as soldaduras são aceites quando cumprem os valores especificados e rejeitadas caso contrário.

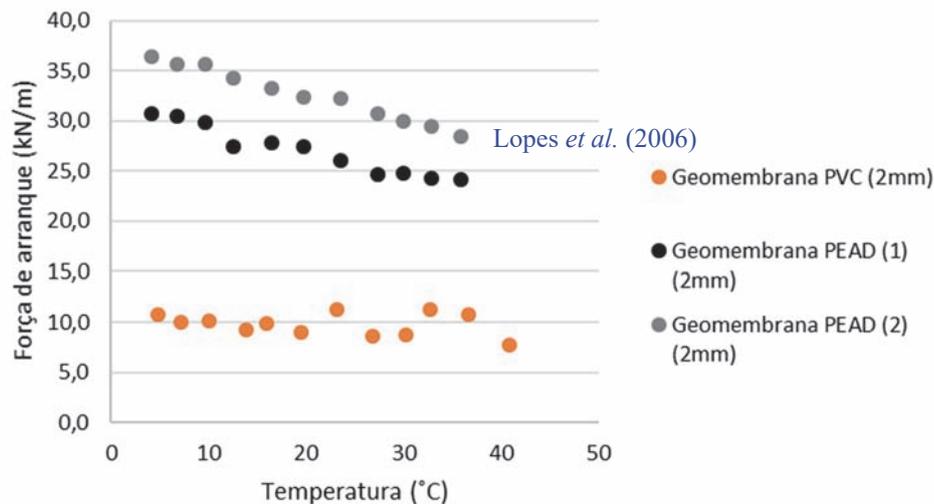
Relativamente à resistência mecânica, Haxo & Kamp (1990) indicam que a resistência das soldaduras deve ser 80 a 90 % da resistência da geomembrana, sendo que no caso do PVC, esse valor é definido nas especificações de projeto. Esta abordagem é diferente da praticada no caso das geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), já que o valor é referente à resistência no ponto de cedência.

Para geomembranas de PVC com espessura superior a 1 mm, as primeiras especificações desenvolvidas pelo *National Sanitation Foundation* (NSF 54, 1993) e relatadas por Haxo & Kamp (1990), propunham que a força de arranque das soldaduras fosse, no mínimo, de 2,6 kN/m. Atualmente, esse valor é ainda referido na especificação da FGI 1117 (2017), para geomembranas com espessuras entre 0,8 mm e 1,5 mm, não sendo definido nenhum valor para geomembranas com espessura superior a 1,5 mm.

Relativamente ao tipo de rotura, não foram encontrados, para geomembranas de PVC, critérios de aceitação/rejeição, tal como acontece, por exemplo, para geomembranas de PEAD (GRI-GM 19). Dada a dificuldade relatada na seção anterior, em classificar os tipos de rotura obtidos para as geomembranas de PVC constituídas por mais do que uma camada, de acordo com a norma, seria útil realizar maior investigação, no sentido de avaliar a adequabilidade do tipo de rotura, bem como a sua utilidade como critério de aceitação/rejeição, neste tipo de geomembranas.

### 3.4 – Comparação entre geomembranas de PVC e de PEAD

Na Figura 11 comparam-se os resultados obtidos no presente estudo com os resultados obtidos por Lopes *et al.* (2006) para geomembranas de PEAD. A figura inclui apenas os resultados para a geomembrana B, soldadura exterior, de 2 mm de espessura, por terem sido as condições também estudadas pelas referidas autoras.



**Fig. 11** – Força de arranque das soldaduras a diferentes temperaturas para geomembranas de PVC e PEAD (Lopes *et al.*, 2006).

Como é possível observar na Figura 11, as geomembranas de PEAD apresentam uma resistência mecânica bastante superior. A força de arranque das soldaduras de geomembranas de PEAD varia num intervalo de valores entre os 24 kN/m e os 36 kN/m, bastante superior ao intervalo obtido para a força de arranque de soldaduras de geomembranas de PVC compreendido entre os 8 kN/m e os 12 kN/m.

É, também, possível observar uma diferença de comportamento entre as duas geomembranas relativamente à influência da temperatura na força de arranque das soldaduras. Para soldaduras de geomembranas de PEAD verifica-se que a força de arranque das soldaduras diminui à medida que

a temperatura aumenta, enquanto, para as soldaduras de geomembranas de PVC, verifica-se que a força de arranque não é significativamente influenciada pela temperatura.

A diferença entre os comportamentos observados neste trabalho e no trabalho relatado por Lopes *et al.* (2006) pode ser justificada pelo facto de os materiais possuírem uma estrutura molecular bastante diferente, o que influencia as propriedades mecânicas do material. Se, por um lado, o PVC é um polímero de estrutura molecular amorfa, com módulo de elasticidade relativamente constante para temperaturas superiores à T<sub>g</sub>, o PEAD, por outro, é um polímero de estrutura molecular semicristalina com módulo de elasticidade decrescente para temperaturas superiores à T<sub>g</sub>.

#### 4 – CONCLUSÕES

Este trabalho visou a avaliação da influência da temperatura na resistência mecânica das soldaduras simples e duplas por termofusão, de geomembranas de PVC com diferentes espessuras (1,5, 2,0 e 3,0 mm). Este aspeto é importante porque, por vezes, em campo, não é possível assegurar a realização dos ensaios de resistência mecânica de controlo de qualidade das soldaduras à temperatura normalizada, levantando questões sobre a aceitação/rejeição das mesmas.

Foram realizados ensaios de arranque, segundo a norma ASTM D 6392, considerando 12 temperaturas distintas, compreendidas entre 5°C e 41°C. Os resultados obtidos foram analisados em termos de resistência ao arranque e tipo de rotura.

No que se refere à resistência ao arranque, verificou-se que a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras, simples e duplas por termofusão, é reduzida, uma vez que os valores obtidos para diferentes temperaturas foram relativamente constantes. A justificação para a reduzida variação nos valores obtidos reside na estrutura molecular amorfa do PVC, o qual apresenta um módulo de elasticidade relativamente constante para temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea, que é na ordem dos -20°C a -25°C, para este tipo de geomembranas.

Relativamente ao tipo de rotura, foi difícil a classificação das roturas obtidas com base na norma ASTM D 6392, especialmente para as geomembranas A e B, o que levanta questões relativamente à utilidade da inclusão do tipo de rotura nos critérios de aceitação/rejeição, no caso de geomembranas de PVC constituídas por mais do que uma camada.

Os resultados obtidos foram, também, comparados com resultados relatados para geomembranas de PEAD, constatando-se diferenças notórias entre a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras dos dois tipos de geomembranas. No caso das soldaduras de geomembranas de PVC, a influência da temperatura revelou-se pouco significativa, contrariamente ao que acontece nas soldaduras de geomembranas de PEAD. As diferenças de comportamento da força de arranque das soldaduras em geomembranas de PVC e PEAD em função da temperatura parecem estar relacionadas com as diferenças na estrutura molecular dos dois materiais.

#### 5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Sotecnisol e Carpi pela cedência do material utilizado neste estudo. Agradecem, também, aos técnicos de laboratório do LNEC, Válter Nascimento e Carlos Martins, pela condução dos ensaios realizados.

#### 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D 6392 (2018). *Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Cazzuffi, D. (2014). *Long-time performance of exposed geomembranes used for the upstream face rehabilitation of dams in Northern Italy*. 10th International Conference on Geosynthetics, IGS (Germany) – German Geotechnical Society, Berlin, Germany, pp. 100–112.

- FGI (Fabricated Geomembrane Institute) (2017). *PVC Geomembrane Material Specification 1117*, University of Illinois, Urbana, IL.
- GRI-GM19 (2011). *Standard Specification for Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes*. Revision 6: October 3, 2011. Geosynthetic Research Institute, Folsom, Pennsylvania, USA. <http://geosynthetic-institute.org/grispeccs/gm19.pdf> (Acesso em 30/08/2018).
- Haxo, H. & Kamp, L. (1990). *Destructive Testing of Geomembrane Seams: Shear and Peel Testing of Seam Strength*. Geotextiles and Geomembranes No.9, pp. 369-395.
- ICOLD (2010). *Geomembrane sealing systems for dams*. Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams, Paris, France.
- Jansen, J.A. (2016). *Plastics – It's All About Molecular Structure*. Consultant's Corner, The Madison Group.
- Lopes, G., Barroso, M. & Costa, C. (2006). *Acceptance criteria for HDPE geomembranes double hot wedge seams: influence of the temperature on peel strength*. 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japão.
- NSF International Standard 54 (1993). *Flexible Membrane Liners*. National Sanitation Foundation, U.S.
- Peggs I. D. (1990). *Destructive testing of polyethylene geomembrane seams: Various methods to evaluate seams strength*. Geotextiles and Geomembranes No. 9 (4), pp. 405-414.
- Sanfona, P. (2018). *Aplicação de Geomembranas de PVC em Barragens: Influência da Temperatura no Controlo das Soldaduras*. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.