XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/47

Influência da temperatura e da velocidade da cunha térmica no desempenho mecânico e térmico de soldas de geomembranas de PEAD

Mateus P. Fleury
Professor Substituto, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, Brasil, mateusfleury@ufscar.br

Erica F. S. Tirelli
Coordenadora Química, Instituto Mauá de Tecnologia (IMT), São Caetano do Sul, Brasil, erica.tirelli@maua.br

Fernando L. Lavoie
Professor Doutor, Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos, Brasil, fernando.lavoie@usp.br

RESUMO: Geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) são amplamente utilizadas como barreiras hidráulicas em obras geotécnicas e ambientais, sendo a integridade das soldas determinante para o desempenho do sistema. Este estudo avaliou a influência da temperatura da cunha térmica e da velocidade de soldagem nas propriedades mecânicas e térmicas de soldas por termofusão em duas geomembranas comercialmente empregadas: uma lisa de 1,0 mm e outra texturizada de 2,0 mm. As soldas foram executadas sob condições controladas, considerando temperaturas de 390 °C e 450 °C e velocidades de 1 m/min e 2 m/min. As emendas foram caracterizadas por ensaios destrutivos de cisalhamento e descolamento, além de análise termogravimétrica em amostras da zona da solda (WZ) e da zona afetada pelo calor (HAZ). Os resultados indicaram que todas as condições atenderam aos requisitos normativos mínimos, embora com margens de segurança distintas entre os materiais e parâmetros avaliados. A condição de 450 °C e 2 m/min apresentou desempenho mais consistente para ambas as geomembranas. Ressalta-se, contudo, que essa recomendação é válida para as condições específicas investigadas, devendo ser confirmada por controle tecnológico em campo antes da aplicação em outros materiais ou contextos.

PALAVRAS-CHAVE: Solda por Termofusão, Cunha Quente, Cisalhamento, Descolamento, Análise Termogravimétrica, Temperatura.

ABSTRACT: High-density polyethylene (HDPE) geomembranes are widely used as hydraulic barriers in geotechnical and environmental works, and the integrity of welded seams is critical to overall system performance. This study evaluated the influence of hot-wedge temperature and welding velocity on the mechanical and thermal properties of thermo-fused seams in two commercially available geomembranes: a 1.0 mm thick smooth geomembrane and a 2.0 mm thick textured geomembrane. Welding was performed under controlled conditions at temperatures of 390 °C and 450 °C and velocities of 1 m/min and 2 m/min. The welded joints were characterized by destructive shear and peel tests, in addition to thermogravimetric analysis conducted on specimens collected from the weld zone (WZ) and the heat-affected zone (HAZ). The results indicated that all welding conditions satisfied the minimum normative requirements, although distinct safety margins were observed depending on geomembrane type and welding parameters. The condition of 450 °C and 2 m/min provided the most consistent overall performance for both geomembranes. However, this recommendation is valid only for the specific materials and conditions investigated and should be confirmed through field quality control procedures prior to application to other materials or operational contexts.

KEYWORDS: Thermo-fusion Welding; Hot Wedge; Shear Strength; Peel Strength; Thermogravimetric Analysis; Temperature.

1 INTRODUÇÃO

A geomembrana, especialmente a de polietileno de alta densidade (PEAD; Vilar et al., 2015), é um dos geossintéticos mais empregados em obras geotécnicas e ambientais. Em razão de sua eficiência econômica, elevada resistência mecânica e compatibilidade química, as geomembranas de PEAD constituem atualmente o material predominante utilizado como sistema de barreira de fluxo em instalações ambientais (Koerner, 2005; Scheirs, 2009).

Ao longo de sua vida útil, a geomembrana encontra-se exposta a agentes ambientais, os quais desencadeiam processos de degradação oxidativa. A oxidação primária do PEAD inicia-se com a ruptura das cadeias poliméricas e a subsequente formação de radicais livres. O processo ocorre em duas etapas principais: inicialmente, uma reação em cadeia promove a formação de peróxidos e hidroperóxidos. Posteriormente, a propagação da cadeia gera novos radicais, uma vez que os hidroperóxidos são convertidos em álcoois (Rowe e Shoaib, 2018).

As geomembranas são usualmente soldadas em campo por meio de equipamentos específicos e procedimentos rigorosamente controlados, a fim de garantir a qualidade da solda. A região da solda é reconhecida como um ponto potencialmente crítico do sistema de barreira de fluxo, pois constitui uma zona de maior suscetibilidade a danos futuros e, consequentemente, à ocorrência de percolação na barreira geotécnica.

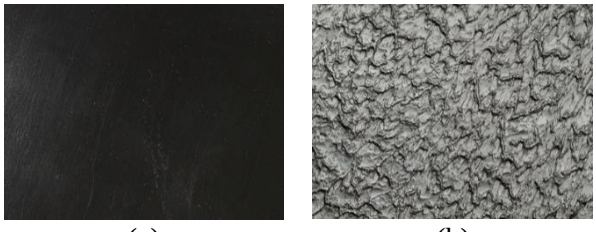
Diversos estudos avaliaram o comportamento de soldas de geomembranas de PEAD. Rowe e Shoaib (2017) investigaram a imersão, por quatro anos, de soldas de geomembrana de PEAD com espessura de 1,5 mm em solução de lixiviado, enquanto Francey e Rowe (2023a) estudaram o comportamento de geomembranas submetidas a diferentes parâmetros de soldagem. Rowe e Shoaib (2018) avaliaram amostras soldadas de geomembrana de PEAD imersas em solução salina por três anos, e Francey e Rowe (2023b) analisaram o efeito dos parâmetros de soldagem na degradação de geomembranas de PEAD após 12 anos de imersão em lixiviado sintético sob condições laboratoriais. Ali e Rowe (2024) investigaram soldas de geomembranas após imersão em soluções sintéticas de lixiviado a 85 °C. Em conjunto, esses estudos demonstram a relevância da avaliação e da especificação das soldas, com ênfase no consumo de antioxidantes e na resistência à fissuração sob tensão (*stress cracking*).

O presente estudo investigou a influência da temperatura e da velocidade da cunha térmica no comportamento mecânico e térmico de soldas de geomembranas de PEAD, considerando dois tipos de geomembranas: lisa com espessura de 1,0 mm (GM-LI) e texturizada com espessura de 2,0 mm (GM-TX).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Foram avaliados dois tipos de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD): uma geomembrana lisa com espessura de 1,0 mm (GM-LI; Figura 1a) e uma geomembrana texturizada com espessura de 2,0 mm (GM-TX; Figura 1b). A primeira é fabricada a partir do processo de extrusão por matriz plana enquanto a segunda é extrusada a partir do processo de matriz balão. Essas geomembranas são comercialmente disponíveis e amplamente utilizadas no mercado brasileiro, tendo sido selecionadas com o objetivo de avaliar a influência da textura superficial na qualidade da solda. A Tabela 1 apresenta um resumo de suas propriedades (com desvio-padrão indicado entre parênteses). Demais propriedades de resistência à tração, ao rasgo e ao puncionamento atendem à GM-13 e não são discutidas neste trabalho.



(a) (b)

Figura 1. Geomembranas investigadas: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

Tabela 1. Propriedades das geomembranas investigadas e requisitos da GM-13 (GRI, 2025).

Propriedade	Norma	GM-LI		GM-TX	
		Valores	Requisitos GM-13	Valores	Requisitos GM-13
Espessura nominal – mm	ASTM D 5199 (2019) ASTM D 5994 (2021)	1,134 (0,141)	Nominal	1,911 (0,076)	-5% Nominal
Altura de aspereza – mm	ASTM D 7466 (2010)	N.A.	N.A.	1,053 (0,165)	≥0,40
Densidade – g/cm³	ASTM D 792 (2020)	0,941 (0,000)	≥0,940	0,944 (0,000)	≥0,940
Teor de Negro de fumo – %	ASTM D 1603 (2020)	1,820 (0,051)	2,0 – 3,0	2,516 (0,025)	2,0 – 3,0
Stress cracking (30%) – h	ASTM D 5397 (2020)	> 500	≥500	> 500	≥500
Tempo de indução oxidativa – h	ASTM D 3895 (2019)	>100	≥100	>100	≥100

* Resultado dos ensaios realizados na direção transversal

Cada geomembrana foi fornecida em rolos com 30 cm de largura e aproximadamente 600 cm de comprimento. Essa largura reduzida, em comparação com aquelas usualmente fornecidas para instalação em campo, justifica-se pelo fato de os materiais terem sido disponibilizados para esta pesquisa durante o Curso Brasileiro de Instalação de Geomembranas "Paulo Kenji Açakura" – Edição 2024, realizado no Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). Assim, como o foco deste estudo recai sobre as soldas das geomembranas, a diferença entre as dimensões das amostras fornecidas e aquelas utilizadas em escala real não compromete os resultados obtidos.

2.2 Métodos

Amostras de geomembranas foram soldadas por termofusão sob condições controladas, e corpos de prova tanto das geomembranas quanto de suas respectivas soldas foram submetidos a ensaios de caracterização. Os resultados foram comparados com as recomendações da norma brasileira NBR 16199 [20]. Os procedimentos adotados são descritos nas subseções a seguir.

2.2.1 Execução das soldas das geomembranas e amostragem

A primeira etapa do estudo consistiu na execução das soldas das geomembranas por termofusão. O processo de soldagem foi conduzido pelo instrutor responsável pela parte prática do Curso Brasileiro de Instalação de Geomembranas "Paulo Kenji Açakura" (Sr. Luduik Rosales), garantindo elevado nível de controle e precisão na execução das soldas.

Quatro painéis de cada tipo de geomembrana, com dimensões de 30 cm de largura por 600 cm de comprimento, foram dispostos de forma contígua, conforme ilustrado na Figura 2a, possibilitando a execução de duas soldas para cada geomembrana. A soldagem por termofusão foi realizada com equipamento modelo SMD-NS900, fabricado pela Zemo Welding Machinery Co., LTD. De acordo com o fabricante, o equipamento permite ajuste de temperatura entre 0 °C e 450 °C, velocidades de soldagem entre 0,5 e 5,0 m/min e é adequado para materiais com espessura entre 1,0 e 3,0 mm, características compatíveis com as geomembranas avaliadas neste estudo. Cabe destacar que, diferentemente do procedimento usual, a solda na geomembrada texturizada foi realizada sem remoção da textura ranhurada (por lixamento) antes da soldagem.

Para cada solda executada, um trecho inicial (detalhado na Seção 2.2.2) foi descartado, pois foi utilizado para verificação do correto posicionamento do equipamento. As soldas executadas foram do tipo dupla cunha aquecida, constituídas por dois cordões paralelos de fusão separados por um canal de ar, empregado para ensaio de controle de qualidade visando à verificação da estanqueidade (ensaio de canal pressurizado; ASTM D5820 ; 2023).

As operações de soldagem foram realizadas em duas temperaturas, 390 °C e 450 °C, cada uma aplicada à união de dois painéis, justificando a disposição de quatro painéis contíguos (Figura 2). Para cada temperatura, a velocidade de soldagem variou entre 1,0 m/min, 2,0 m/min e 3,0 m/min, sendo os pontos de transição entre



(a) (b)

Figura 2. Processo de soldagem: (a) disposição dos painéis de geomembrana para o processo de soldagem, e (b) marcas nos painéis de geomembrana indicando a mudança de velocidade do equipamento.

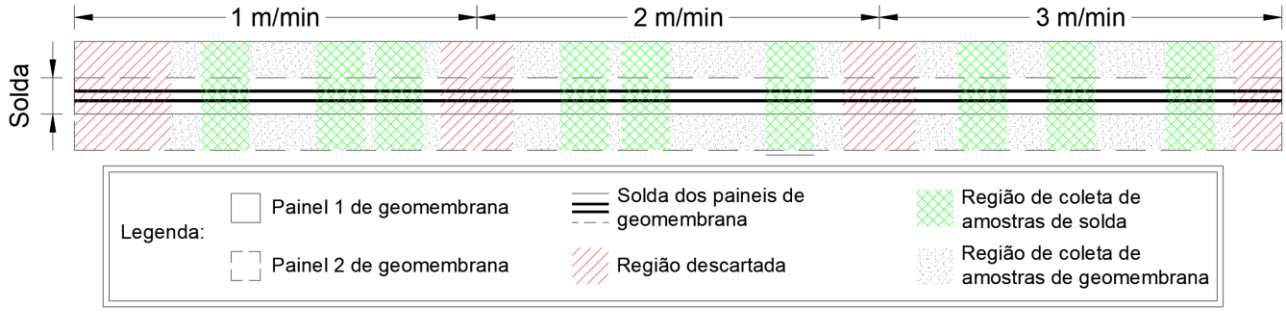


Figura 3. Regiões descartadas para amostragem nos painéis de geomembrana soldados.

velocidades devidamente marcados (Figura 2b). As soldas executadas a 3,0 m/min não fazem parte do escopo deste trabalho.

Todos os parâmetros de soldagem foram registrados, a fim de garantir rastreabilidade e permitir a correlação entre condições de execução e resultados obtidos. Além dos parâmetros do equipamento, as soldas foram realizadas sob temperatura ambiente de 21 ± 0,5 °C e umidade relativa de 62%.

Após a execução das soldas, os painéis foram transportados ao Laboratório de Geossintéticos do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) e armazenados conforme a ASTM D4873 (2021). Posteriormente, foram dispostos sobre uma bancada de trabalho e divididos em diferentes regiões (Figura 3). As extremidades e as zonas de transição foram descartadas para evitar heterogeneidade. As regiões destinadas à coleta de amostras de solda foram selecionadas aleatoriamente, consistindo em três segmentos de aproximadamente 30 cm para cada velocidade de soldagem. As regiões remanescentes de cada painel foram destinadas à amostragem da geomembrana, desconsiderando-se as soldas.

2.2.2 Caracterização das soldas das geomembranas

O comportamento das soldas foi analisado por meio do ensaio de descolamento e cisalhamento (ASTM D6392, 2018). Corpos de prova com dimensões de 25 mm × 150 mm (direções transversal e longitudinal, respectivamente) foram ensaiados em equipamento universal de tração/compressão. Cada amostra foi fixada com garras de mordente (mínimo de 25 mm em cada extremidade) e submetida a deslocamento constante de 50 mm/min até a ruptura. Foram realizados dez ensaios (cinco para cada solda).

No ensaio de cisalhamento, os corpos de prova foram fixados com 25 mm em cada extremidade e tracionados à velocidade constante de 50 mm/min. O ensaio foi encerrado ao atingir 50% de deformação ou a ruptura, prevalecendo o que ocorresse primeiro. Cinco amostras foram ensaiadas nessa condição.

A Análise Termogravimétrica (TG) foi realizada com aquecimento à taxa constante, em duas etapas sob purga de nitrogênio na faixa de 25 °C a 600 °C. Contudo, para cada solda, foram amostradas duas regiões específicas – Zona Afetada pelo Calor (HAZ; *Heat Affected Zone*) e Zona da Solda (WZ; *Weld Zone*) – a fim de comparar o comportamento do material (Figura 4).

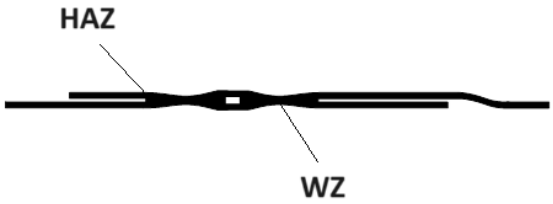


Figura 5. Pontos de amostragem nas soldas das geomembranas selecionados para ensaios Análise Termogravimétrica (TG).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaios destrutivos nas soldas de geomembrana

A avaliação dos parâmetros de solda deve seguir as recomendações da norma brasileira NBR 16199 (ABNT, 2020), segundo a qual os parâmetros mínimos de resistência das soldas de geomembranas – baseados em ensaios destrutivos – são estabelecidos em função da espessura da geomembrana. As espessuras das geomembranas GM-LI e GM-TX são, respectivamente, 1,134 mm e 1,911 mm (Tabela 1). Assim, foram adotadas como espessuras de referência 1,0 mm para a GM-LI e 2,0 mm para a GM-TX.

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados de resistência ao cisalhamento e ao descolamento das soldas das geomembranas, respectivamente, para cada cenário de soldagem avaliado. As barras representam os valores médios, enquanto as barras de erro indicam os valores mínimo e máximo obtidos a partir de cinco corpos de prova. As setas de dupla extremidade indicam a margem acima da resistência mínima recomendada pela NBR 16199 (ABNT, 2020), representada pela linha tracejada.

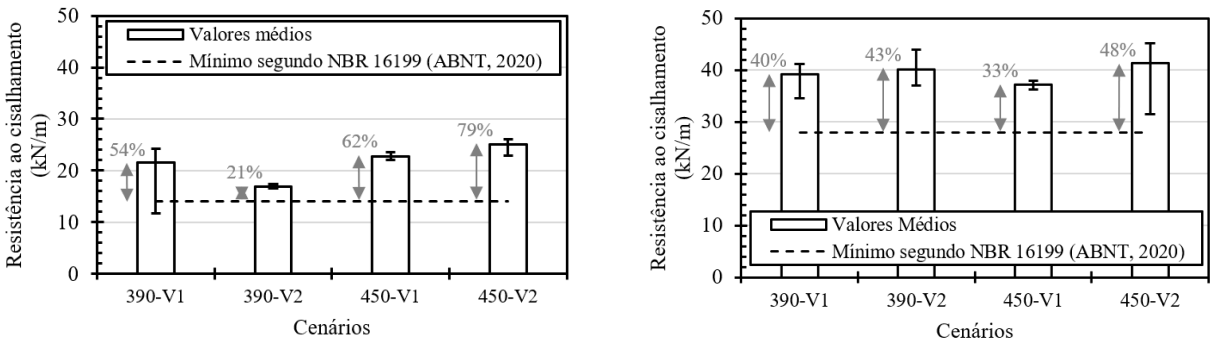


Figura 6. Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento nas soldas das geomembranas de PEAD: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

Conforme observado na Figura 6, os valores de resistência ao cisalhamento em todos os cenários ensaiados superaram os limites mínimos estabelecidos pela norma de referência. Entre as geomembranas avaliadas, a GM-TX apresentou a menor margem de segurança (em média 41% acima do valor mínimo exigido) se comparada a GM-LI (em média 54% acima), com exceção do cenário 390-V2, em que a resistência ao cisalhamento da solda da GM-LI apresentou margem inferior ao mesmo cenário da GM-TX.

A comparação entre as velocidades de soldagem revelou que as soldas executadas a 2 m/min, de modo geral, apresentaram maiores resistências ao cisalhamento do que aquelas realizadas a 1 m/min (com exceção da GM-SM soldada a 390 °C). Quanto à temperatura da cunha térmica, os

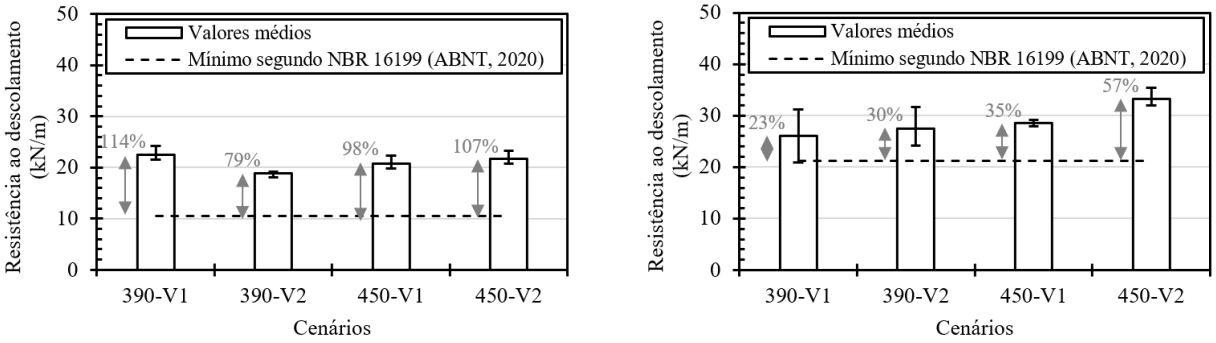


Figura 7. Resultados dos ensaios de resistência ao descolamento nas soldas das geomembranas de PEAD: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

resultados mostraram comportamento distinto entre os materiais: a GM-LI apresentou maiores resistências ao cisalhamento quando soldada a 450 °C, enquanto a GM-TX apresentou resultados, de certa forma, semelhantes (coeficiente de variação de 4,5% - 1,79 kN/m) na resistência ao cisalhamento entre as soldas realizadas com temperatura diferentes).

Todos os cenários avaliados para a GM-LI apresentaram resistências ao descolamento superiores ao valor mínimo exigido pela norma (Figura 7). Por outro lado, embora a GM-TX tenha apresentado valores médios de resistência ao descolamento iguais ou ligeiramente superiores ao limite mínimo, um corpo de prova soldados a 390 °C não atingiu a resistência mínima exigida. Com base nos resultados da Figura 7, não foi possível identificar uma tendência clara quanto à influência da velocidade ou da temperatura de soldagem na obtenção da maior resistência ao descolamento. No caso da GM-LI, as margens de resistência ao deslocamento em relação ao valor mínimo exigido foram, de certa forma semelhantes (todas superiores a 75%). Já no caso da GM-TX, nota-se que as resistências ao descolamento foram superiores nos cenários em que a execução da solda ocorreu sob temperatura de 450°C ou com velocidade de 2 m/min.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento e descolamento não indicam uma única condição ótima de soldagem aplicável a todos os tipos de geomembrana. Ao contrário, a condição de soldagem mais eficiente mostrou-se dependente da textura e da formulação do material. As margens de segurança acima dos valores mínimos de resistência são particularmente relevantes, uma vez que a degradação das soldas tende a reduzir tanto a resistência ao cisalhamento quanto ao descolamento ao longo do tempo.

3.2 Análise termogravimétrica nas soldas de geomembrana

A Figura 8 apresenta as temperaturas máximas de degradação térmica extraídas das curvas de Análise Termogravimétrica (TG) realizadas na zona da solda (WZ) e zona afetada pelo calor (HAZ) dos distintos cenários de solda das geomembranas investigadas neste estudo. A comparação desta temperatura, para os distintos cenários, permite avaliar a estabilidade térmica dos dois pontos (WZ e HAZ) após a realização das soldas.

A análise da Figura 8a, referente à geomembrana lisa (GM-LI), evidencia que a estabilidade térmica do material após o processo de soldagem está fortemente condicionada à velocidade de avanço da cunha térmica (equipamento). Nos cenários em que a soldagem foi realizada com velocidade de 2 m/min (390-V2 e 450-V2), tanto a zona de solda (WZ) quanto a zona afetada pelo calor (HAZ) apresentaram temperaturas máximas de degradação térmica superiores à da amostra de referência, o que indica um ganho aparente de estabilidade térmica. Esse comportamento pode ser atribuído à exposição térmica mais controlada, que favorece a fusão sem induzir degradação significativa do polímero. Em contrapartida, quando a velocidade da cunha foi de 1 m/min (390-V1

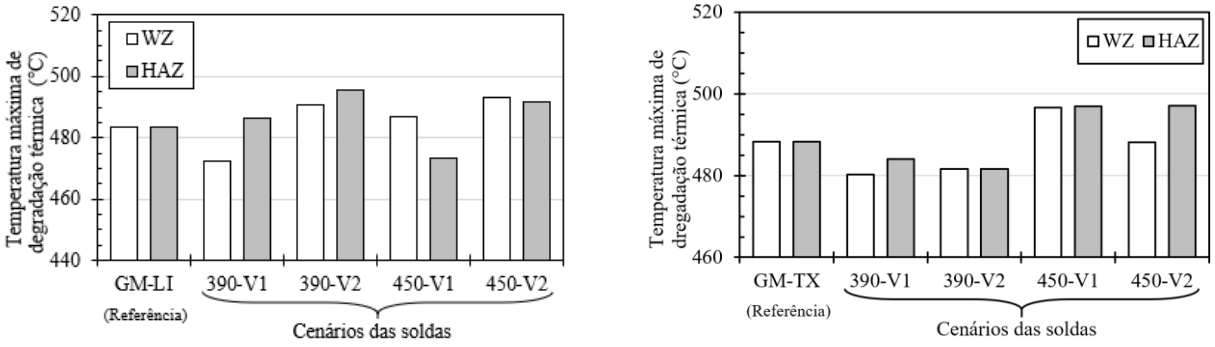


Figura 8. Temperaturas máximas de degradação térmica obtidas por Análise Termogravimétrica (TG) para a Zona da Solda (WZ) e a Zona Afetada pelo Calor (HAZ) das geomembranas: (a) GM-LI e (b) GM-TX.

e 450-V1), evidenciou-se temperaturas máximas inferiores à referência em, ao menos, uma das duas regiões de interesse (WZ e HAZ). Neste caso, diferente da velocidade mais alta da cunha (V2), a menor velocidade (1 m/min; V1) promoveu superaquecimento localizado e possível degradação térmica incipiente.

Os resultados obtidos pelos ensaios de TGA nas soldas da GM-TX (Figura 8b) revelaram comportamento térmico que varia em função dos parâmetros de solda utilizados. Nos cenários com temperatura de 390 °C, observa-se que tanto a zona de solda (WZ) quanto a zona afetada pelo calor (HAZ) apresentaram temperaturas máximas de degradação inferiores à amostra de referência, indicando possível início de degradação térmica decorrente da exposição à cunha térmica. Já nos cenários com temperatura de 450 °C, os resultados mostram temperaturas máximas de degradação térmica iguais ou superiores às temperaturas de referência, sobretudo quando avaliada a região contígua a solda (HAZ).

Esses resultados (Figura 8) reforçam que os parâmetros de soldagem devem ser ajustados individualmente para cada tipo de geomembrana, considerando suas características físico-químicas e estruturais. A simples replicação de um cenário de solda considerado ótimo para uma geomembrana pode resultar em degradação térmica significativa em outra, comprometendo a durabilidade e o desempenho do sistema de barreira de fluxo.

4 CONCLUSÕES

Este estudo investigou a influência da temperatura e da velocidade da cunha térmica nas propriedades das soldas. Geomembranas lisa com espessura de 1,0 mm e texturizada com espessura de 2,0 mm foram soldadas por termofusão sob condições controladas, considerando temperaturas de 390 °C e 450 °C e velocidades de 1 m/min e 2 m/min. Amostras soldadas foram coletadas e submetidas a ensaios destrutivos de cisalhamento e descolamento, bem como a análise térmica (TG).

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se, para ambas as geomembranas avaliadas, a adoção da condição de soldagem com temperatura de 450 °C e velocidade de 2 m/min, por ter proporcionado desempenho mecânico mais consistente e maiores margens de segurança, sem evidências relevantes de instabilidade térmica nas regiões analisadas.

Ressalta-se, contudo, que essa recomendação está condicionada às características específicas dos materiais, do equipamento e das condições ambientais investigadas neste estudo, devendo, em aplicação prática, ser validada por meio de ensaios de controle tecnológico em campo e procedimentos sistemáticos de verificação da qualidade das soldas antes da liberação do serviço. A simples replicação de uma condição de soldagem considerada ótima para um material pode induzir degradação térmica significativa em outro, comprometendo potencialmente a durabilidade e o desempenho global do sistema de barreira de fluxo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16199. *Barreiras geossintéticas – Instalação de geomembranas poliméricas.* Rio de Janeiro.

Ali, M., Rowe, R. K. (2024) Long-term performance of HDPE extrusion welds aged at 85°C in synthetic leachate. *Geosynthetics International*, 32(1), p. 139-150.

ASTM International (2020). ASTM D 1603: *Standard Test Method for Carbon Black Content in Olefin Plastics*.

ASTM International (2019). ASTM D 3895: *Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry*.

ASTM International (2019). ASTM D 5199: *Standard Test Methods for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.*

ASTM International (2021). ASTM D 5994: *Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes.*

ASTM International (2010). ASTM D 7466: *Standard Test Method for Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane*.

ASTM International (2020). ASTM D 792: *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*.

ASTM International (2021). ASTM D4873: *Standard Guide for Identification, Storage, and Handling of Geosynthetic Rolls and Samples*.

ASTM International (2020). ASTM D5397: *Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test.*

ASTM International (2023). ASTM D5820: *Standard Practice for Pressurized Air Channel Evaluation of Dual-Seamed Geomembranes.*

ASTM International (2018). ASTM D6392: *Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods*.

Francey, W., Rowe, R. K. (2023a). Importance of thickness reduction and squeeze-out Std-OIT loss for HDPE geomembrane fusion seams. *Geotextiles and Geomembranes*, 51(1), p. 30-42.

Francey, W., Rowe, R. K. (2023b). Long-term stress crack resistance of HDPE fusion seams aged at 85 °C in synthetic leachate. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(3), p. 251-268.

Koerner, R.M. (2005). *Designing with geosynthetics*. 5th ed., Prentice Hall, New Jersey, USA, 818 p.

Rowe, R.K., Shoaib. M. (2017). Long-term performance of high-density polyethylene (HDPE) geomembrane seams in municipal solid waste (MSW) leachate. *Canadian Geotechnical Journal*, 54, p. 1623-1636.

Scheirs, J. (2009) A guide to polymeric geomembranes: a practical approach. 1st ed.,Wiley, London, UK.

Vilar, O.M., Bueno, B.S., Benvenuto, C. (2015). Manual brasileiro de geossintéticos. 2nd ed., Edgard Blücher, São Paulo, BR, Cap. 14.