

## Degradação de geomembrana texturizada de PEAD exposta por 5 anos em cobertura de aterro sanitário

Maria Alejandra Aparicio-Ardila

Estudante de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, maparicio@usp.br

Carolina Fofonka Palomino

Gerente de Qualidade, Nortene Plásticos, Barueri, Brasil, carolina.palomino@gruponortene.com.br

Thiago Victor da Silva Costa

Diretor, Tecnoplas Engenharia, São Paulo, Brasil, thiago@tecnoplas.com.br

Clever Aparecido Valentin

Técnico de laboratório, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, cclever@sc.usp.br

Jefferson Lins da Silva

Professor Associado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

**RESUMO:** A geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) é amplamente utilizada em obras geotécnicas e ambientais, porém, é suscetível à degradação. Para avaliar essa degradação, é crucial conhecer as características originais, o que é viável quando um projeto segue a norma brasileira de instalação, permitindo a rastreabilidade da amostra virgem. Neste estudo, foi analisada a degradação de uma geomembrana de PEAD texturizada usada como cobertura de aterro sanitário e exposta por cinco anos. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas da geomembrana e realizado o ensaio térmico de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC em Inglês). Com base na amostra virgem, foi possível determinar o percentual de degradação durante o período de exposição. Os resultados indicaram que o teor de negro de fumo e a resistência à tração na ruptura foram os parâmetros mais afetados, com uma redução de cerca de 30%. Apesar disso, a maioria das propriedades analisadas ainda atende aos valores mínimos da especificação GRI-GM13. Os ensaios de índice de fluidez e DSC apresentaram resultados interessantes, sugerindo mudanças na estrutura da geomembrana a nível molecular. Para uma compreensão mais aprofundada da degradação, recomenda-se a inclusão de ensaios térmicos complementares.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geomembrana PEAD, aterro sanitário, degradação, durabilidade.

**ABSTRACT:** High-Density Polyethylene (HDPE) geomembranes are widely utilized in geotechnical and environmental engineering projects; however, they are susceptible to degradation. To assess this degradation, it is crucial to know the original characteristics, which is feasible when a project follows the Brazilian Installation standard, allowing for traceability of the virgin sample. In this study, the degradation of a textured HDPE geomembrane used as landfill cover and exposed for five years was analyzed. The physical and mechanical properties of the geomembrane were evaluated, and Differential Scanning Calorimetry (DSC) thermal analysis was conducted. Based on the virgin sample, it was possible to determine the percentage of degradation during the exposure period. The results indicated that the content of carbon black and the tensile strength at break were the most affected parameters, with a reduction of approximately 30%. Despite this, most of the analyzed properties still meet the minimum values of the GRI-GM13 specification. The melt flow index tests and DSC provided interesting results, suggesting changes in the geomembrane's molecular structure. For a more comprehensive understanding of the degradation, the inclusion of additional thermal tests is recommended.

**KEYWORDS:** HDPE Geomembrane, landfill, degradation, durability.

## 1 INTRODUÇÃO

As geomembranas de PEAD são frequentemente utilizadas como barreiras para prevenir a infiltração de líquidos e gases em diversas aplicações geotécnicas e ambientais, como indicado por Rowe (2005). Elas podem ter superfícies lisas ou texturizadas. Em particular, as geomembranas texturizadas de PEAD são escolhidas para projetos ambientalmente sensíveis, como aterros sanitários e atividades de mineração, devido à sua capacidade de aumentar o atrito e, por consequência, melhorar o fator de segurança, reduzindo assim o risco de falhas por deslizamento entre camadas. Existem dois principais métodos de fabricação para geomembranas texturizadas de PEAD: o processo de matriz plana, no qual a textura é impressa por meio de calandras, e o processo de matriz circular ou balão, que envolve a injeção de nitrogênio para criar a textura (Junior et al., 2022; Scheirs, 2009).

A norma técnica ABNT NBR 16199 apresenta importantes recomendações na instalação de geomembranas em obras de engenharia no Brasil, assegurando sua eficácia como barreiras impermeabilizantes e garantindo a qualidade do processo. Essa norma destaca a importância de manter registros detalhados da instalação, conhecidos como '*as built*', que documentam informações cruciais como localização das emendas, detalhes das soldagens e resultados dos ensaios de controle de qualidade. O '*as built*' é essencial para a manutenção, inspeção e reparos futuros, proporcionando um histórico detalhado que facilita a identificação de problemas. Assim, a ABNT NBR 16199 enfatiza a importância desses registros como ferramentas de gestão de qualidade e rastreabilidade.

A geomembrana é essencial para coberturas finais de aterros sanitários, aumentando a estabilidade e prevenindo a infiltração de água. O uso de geomembranas nos aterros é vital para isolar resíduos, minimizando impactos ambientais e protegendo a saúde pública. Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a durabilidade de uma geomembrana de PEAD texturizada exposta por cinco anos em uma cobertura permanente de aterro sanitário. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica, determinação do índice de fluidez e o ensaio térmico DSC, todos conduzidos no Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

Este estudo investiga a durabilidade e degradação de uma geomembrana de PEAD exposta, utilizando como referência a amostra virgem da mesma bobina instalada, rastreada pelo '*as built*' de instalação. Ao contrário de estudos anteriores que se baseiam exclusivamente nos valores mínimos da especificação GRI-GM13, o presente trabalho proporciona uma análise mais precisa da degradação da geomembrana exposta, possibilitando comparações mais detalhadas. O principal objetivo é quantificar a degradação da geomembrana ao longo de cinco anos de exposição, aprimorando o entendimento de sua durabilidade em contextos de aterros sanitários.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Geomembrana

A geomembrana utilizada nesta pesquisa consiste em uma geomembrana de PEAD texturizada em ambas as faces de 2,0 mm, produzida por meio do processo de extrusão em matriz plana. A amostra exposta foi exumada da cobertura de um aterro sanitário situado no estado do Rio de Janeiro, que processa aproximadamente 10 mil toneladas de resíduos sólidos diariamente. A referida amostra fazia parte da cobertura permanente de uma das células do aterro e foi removida durante um procedimento de reparo da cobertura, tendo permanecido exposta por um período de cinco anos.

Por outro lado, a amostra virgem, fabricada em 2018, foi identificada e rastreada por meio do número de bobina, conforme registrado no documento '*as built*' de instalação. Posteriormente, essa amostra foi disponibilizada a partir do acervo do fabricante para fins de comparação e análise neste estudo.

## 2.2 Ensaios Físicos e Mecânicos

Dentre os ensaios físicos conduzidos estão: espessura, densidade, teor de negro de fumo e dispersão de negro de fumo, realizados conforme as normas ASTM D5199, ASTM D792, ASTM D4218 e ASTM D5596, respectivamente. Além de alguns ensaios físicos listados na especificação GRI-GM13 para geomembranas de PEAD, foi executado o ensaio de índice de fluidez, mencionado na mesma especificação, porém aplicado ao controle de qualidade da resina.

O ensaio de índice de fluidez foi conduzido de acordo com a norma ASTM D1238, utilizando um plastômetro automatizado. Os ensaios foram realizados sob diversas condições de carga aplicada (2,16 kg, 5 kg, 10 kg e 21,6 kg) a uma temperatura de 190°C. A massa do polímero fundido extrudado em 10 minutos (em gramas de material/10 min) é expressa como o índice de fluidez. Adicionalmente, determinou-se a razão de fluidez ou MFR (*Melt Flow Ratio*), que é a relação entre o índice de fluidez na condição de 21,6 kg/190°C e na condição de 2,16 kg/190°C.

Para avaliar as propriedades mecânicas, foram realizados os ensaios de resistência à tração na ruptura e no escoamento, conforme a norma ASTM D6693, e o ensaio de resistência ao rasgo, conforme a ASTM D1004.

## 2.3 DSC

Neste estudo, empregou-se o ensaio térmico DSC para investigar as alterações moleculares em ambas amostras (virgem e exposta), avaliando-se os pontos de fusão e cristalização. Os ensaios foram conduzidos utilizando um equipamento DSC Stare fabricado pela Mettler Toledo, localizado em Columbus, EUA. A análise DSC foi realizada em um cadinho de alumina, abrangendo uma faixa de temperatura de -70 a 200 °C, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL/min e taxa de aquecimento de 20 °C/min, seguindo a metodologia proposta por Valentin et al. (2018). O procedimento experimental incluiu dois ciclos consecutivos de aquecimento, conforme realizado por Aparicio-Ardila et al. (2021).

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 Ensaios Físicos e Mecânicos

Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras virgem e exposta. A resistência a tração tanto na ruptura como no escoamento foi avaliada em ambas direções de fabricação, longitudinal (direção da máquina) e transversal. Na Tabela 1 também é apresentada a variação percentual entre os resultados obtidos para cada uma das propriedades analisadas. Observa-se que o alongamento na ruptura em ambas direções foi a propriedade que sofreu de maior diminuição (35,35% longitudinal e 39,98% transversal) e maior variação no desvio padrão. Sendo que, valores altos de variação no desvio padrão são comuns nos ensaios de geomembranas texturizadas. A propriedade física que apresentou redução após a exposição foi o teor de negro de fumo, com uma diminuição de 31,79%, possivelmente associada à perda de antioxidantes. As outras propriedades físicas (espessura e densidade) mostraram aumentos pouco significativos após a exposição.

No que se refere às propriedades mecânicas, a resistência à tração na ruptura apresentou uma diminuição significativa após a exposição (30,71% no sentido longitudinal e 21,60% no sentido transversal), enquanto a tração no escoamento teve uma variação de  $\pm 0,7\%$  em relação aos valores de referência.

Tabela 1. Resultados dos ensaios físicos e mecânicos e variação em relação à amostra virgem

Propriedade	Método de ensaio	Virgem	Exposta	Variação (%)
Espessura (mm)	ASTM D5199	2,06 ( $\pm 0,05$ )	2,08 ( $\pm 0,12$ )	-0,97
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D792	0,9473 ( $\pm 0,0001$ )	0,9480 ( $\pm 0,0002$ )	-0,07
Teor de Negro de Fumo (%)	ASTM D4218	2,80 ( $\pm 0,12$ )	1,91 ( $\pm 0,27$ )	31,79
Dispersão de Negro de Fumo	ASTM D5596	Categoria I	Categoria I	-
Resistência à tração na ruptura L (kN/m)		55,36 ( $\pm 2,40$ )	38,36 ( $\pm 7,57$ )	30,71
Resistência à tração no escoamento L (kN/m)		37,63 ( $\pm 2,59$ )	37,90 ( $\pm 0,42$ )	-0,72
Alongamento na ruptura L (%)	ASTM D6693	534,30 ( $\pm 20,54$ )	345,40 ( $\pm 118,65$ )	35,35
Resistência à tração na ruptura T (kN/m)		53,88 ( $\pm 7,39$ )	42,24 ( $\pm 0,59$ )	21,60
Resistência à tração no escoamento T (kN/m)		42,51 ( $\pm 4,11$ )	42,23 ( $\pm 0,58$ )	0,66
Alongamento na ruptura T (%)		477,90 ( $\pm 85,53$ )	286,83 ( $\pm 154,63$ )	39,98
Resistência ao Rasgo (kN/m)	ASTM D1004	361,60 ( $\pm 8,84$ )	339,70 ( $\pm 18,44$ )	6,06

L = Longitudinal, T = Transversal. Desvio padrão entre parêntesis.

Para facilitar a compreensão da variação da resistência à tração no escoamento após a exposição, apresenta-se a Figura 1. Esta figura ilustra as curvas médias de resistência à tração no escoamento das amostras virgem e exposta, tanto na direção longitudinal quanto na transversal.

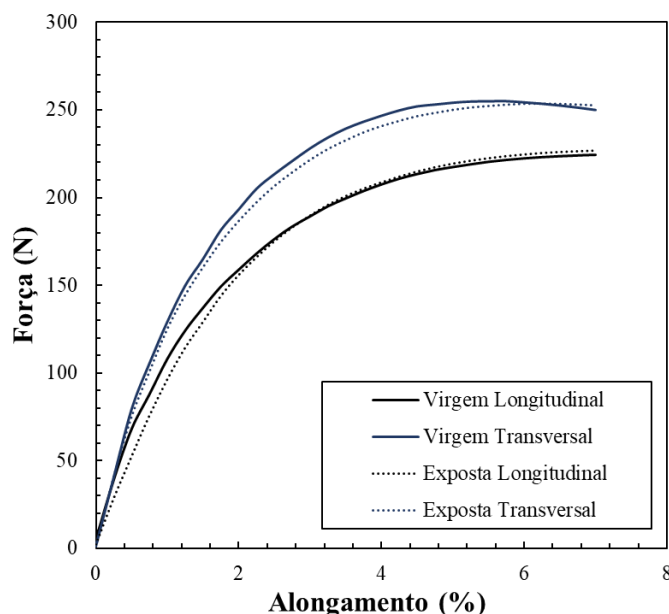


Figura 1. Curvas médias de resistência à tração no escoamento.

Os resultados dos índices de fluidez obtidos e apresentados na Tabela 2, mostraram-se inferiores aos valores típicos reportados na literatura, com a exceção dos valores encontrados no estudo de Rowe et al. (2019), que encontraram índices de fluidez de 0,08 (2,16kg/190°C) e 10,08 (21,6kg/190°C) para uma geomembrana de 1,5 mm utilizada em aterro sanitário. A discrepância entre os valores de índice de fluidez obtidos e aqueles da literatura pode ser atribuída à forma de fabricação da geomembrana, visto que a maioria dos estudos

publicados empregou amostras produzidas pelo processo de matriz balão. Lavoie et al. (2020) destacaram que uma geomembrana de PEAD com baixo índice de fluidez (menos de 1,0 g/10 min na condição de 2,16kg/190°C) exibe boa resistência ambiental à fissuração por tensão. No presente estudo, o MFR (razão de fluidez) da amostra virgem foi de 160,87 e da amostra degradada foi de 185,56, indicando um aumento de 14,25%. Telles et al. (1984) ressaltaram a importância do índice de fluidez como parâmetro para comparar amostras virgens com amostras expostas ou exumadas, visto que variações nesse índice podem indicar potenciais degradações do polímero.

Tabela 2. Valores de índice de fluidez sob diferentes cargas a 190°C.

Carga (kg)	Índice de Fluidez (g/10min)		Variação (%)
	Virgem	Exposta	
2,16	0,046 (±0,002)	0,041 (±0,001)	10,87
5	0,252 (±0,002)	0,252 (±0,002)	0,00
10	1,120 (±0,001)	1,153 (±0,001)	-2,95
21,6	7,400 (±0,046)	7,608 (±0,029)	-2,81

Desvio padrão entre parêntesis.

### 3.2 DSC

As curvas de DSC com os pontos de fusão e de cristalização são apresentadas nas Figuras 2a e 2b para cada ciclo de aquecimento e resfriamento, ressaltando que os ciclos foram consecutivos. As curvas em ambos os ciclos mostram que as etapas de fusão e de cristalinidade ocorreram de forma homogênea, indicando que não houve reações de sobreposição devido aos efeitos causados pela exposição do material.

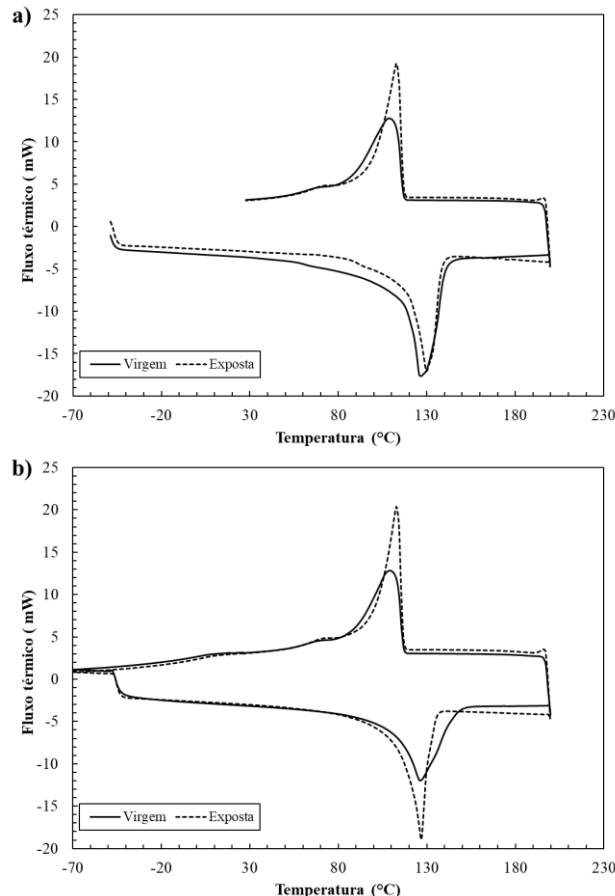


Figura 2. Ensaio Térmico DSC. a) Primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento e b) segundo ciclo de aquecimento e resfriamento.

Por outro lado, a Tabela 3 apresenta a temperatura dos pontos de fusão e de cristalização. No primeiro ciclo de aquecimento, ambas as amostras (virgem e exposta) possuem pontos de fusão próximos, de 127°C para a amostra virgem e 129,7 °C para a amostra exposta. Os pontos tanto de fusão quanto de cristalinidade foram inferiores na amostra virgem. O ponto de fusão da amostra exposta é superior em ambos os ciclos analisados, enquanto o ponto de cristalização em ambas as amostras não muda de um ciclo para outro.

O segundo ciclo vem de um ciclo de resfriamento controlado, o que remove a história térmica do material, motivo pelo que se observam menos variações neste ciclo, onde a amostra exposta atingiu o ponto de fusão inicial da amostra virgem de 127°C.

Tabela 3. Temperatura dos pontos de fusão e cristalização.

Amostra	Ciclo 1		Ciclo 2	
	Ponto de fusão	Ponto de cristalização	Ponto de fusão	Ponto de cristalização
Virgem	127,0°C	109,0°C	125,7°C	109,0°C
Exposta	129,7°C	113,0°C	127°C	113,0°C

#### 4 CONCLUSÕES

Este estudo determinou a degradação de uma geomembrana de PEAD texturizada de 2,00 mm utilizada para cobertura de aterro sanitário, com base na amostra virgem original. Os resultados obtidos indicam que, entre as propriedades analisadas, o teor de negro de fumo e a resistência à tração na ruptura foram os parâmetros mais afetados, apresentando uma diminuição de aproximadamente 30%. No entanto, mesmo após cinco anos de exposição, as propriedades analisadas ainda estão acima dos valores mínimos de referência estabelecidos na especificação GRI-GM13, com exceção do teor de negro de fumo, que se encontra 4,5% abaixo do valor mínimo de referência (2%).

Os ensaios de índice de fluidez e DSC apresentaram resultados interessantes, sugerindo mudanças na estrutura da geomembrana a nível molecular. No entanto, para uma compreensão mais completa da degradação, recomenda-se a inclusão de ensaios térmicos como: OIT, HPOIT, cinética por TG, TMA, DMA, difração de raio x, cromatografia gasosa com espectrometria de massas e ensaios de *Stress Cracking*. Esses ensaios podem fornecer informações complementares sobre o processo de degradação da geomembrana, auxiliando na avaliação de sua durabilidade e na definição de medidas preventivas para aumentar sua vida útil em aplicações práticas.

#### AGRADECIMENTOS

À TECNOPLAS pelo fornecimento da amostra degradada. A empresa NORTENE, pelo fornecimento da amostra virgem. Ao Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos -USP pelo suporte técnico. A CAPES pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio-Ardila, M. A., Pedroso, G. O. M., Kobelnik, M., Valentin, C. A., da Luz, M. P., & Lins da Silva, J. (2021). Evaluating the degradation of a nonwoven polypropylene geotextile exposed to natural weathering for 3 years. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7, 1-11.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 1699. *Barreiras geossintéticas — Instalação de geomembranas poliméricas*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2019). ASTM D5199: *Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics*.
- ASTM International (2020). ASTM D1238: *Standard method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer*.
- ASTM International (2020). ASTM D4218: *Standard test for determination of carbon black content in polyethylene compounds by the muffle- furnace technique*.
- ASTM International (2020). ASTM D6693: *Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes*.
- ASTM International (2020). ASTM D792: *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*.
- ASTM International (2021). ASTM D1004: *Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting*.
- ASTM International (2021). ASTM D5596: *Standard test method for microscopic evaluation of the dispersion of carbon black in polyolefin geosynthetics*.
- Geosynthetics Research Institute (2021). GRI—GM13: *test methods, test properties and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes*.
- Junior, S. L. D. C., Aparicio-Ardila, M. A., Palomino, C. F., & Lins da Silva, J. (2023). Analysis of Textured Geomembrane–Soil Interface Strength to Mining Applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(1), 3.
- Lavoie, F. L., Valentin, C. A., Kobelnik, M., Lins da Silva, J., & Lopes, M. D. L. (2020). HDPE Geomembranes for environmental protection: Two case studies. *Sustainability*, 12(20), 8682.
- Rowe, R. K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. *Geotechnique*, 55(9), 631-678.
- Rowe, R. K., Morsy, M. S., & Ewais, A. M. R. (2019). Representative stress crack resistance of polyolefin geomembranes used in waste management. *Waste management*, 100, 18-27.
- Scheirs, J. (2009). *A guide to polymeric geomembranes: a practical approach*. John Wiley & Sons.
- Telles, R. W., Lubowitz, H. R., & Unger, S. L. (1984). Assessment of environmental stress corrosion of polyethylene liners in landfills and impoundments. *Report on Contract*, 68-03.
- Valentin, C. A., da Silva, J. L., Kobelnik, M., & Ribeiro, C. A. (2019). Thermoanalytical and dynamic mechanical analysis of commercial geomembranes used for fluid retention of leaching in sanitary landfills. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 471-481.