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/COBRAMSEG2026.6/32

Durabilidade de Geomembranas Texturizadas de Polietileno de Alta Densidade Expostas à Radiação Ultravioleta em Laboratório Avaliada por Espectrometria no Infravermelho

Jaedson Alves Ferreira
Mestrando, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jaedson.f3593@ufob.edu.br

Júlia de Sousa Dourado
Graduanda, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, julia.d4277@ufob.edu.br

Maria Alejandra Aparicio Ardila
Pós-doutoranda, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, maparicio@usp.br

Jefferson Lins da Silva
Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, jefferson@sc.usp.br

Sérgio Macedo Soares
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, sergio.soares@ufob.edu.br

José Domingos Santos da Silva
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jose.silva@ufob.edu.br

José Luiz Ernandes Dias Filho
Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

RESUMO: O presente trabalho avalia a durabilidade de geomembranas texturizadas de polietileno de alta densidade (PEAD) fabricadas pelo método de extrusão com matriz balão, quando submetidas à radiação ultravioleta em condições controladas de laboratório. O estudo teve como objetivo investigar as alterações químicas associadas aos processos de degradação oxidativa, comparando-se a superfície texturizada e a porção de borda lisa do material. Amostras virgens e envelhecidas foram expostas em câmara de intemperismo acelerado com lâmpadas UVA-340, em ciclos de irradiação e condensação, por períodos de até 2000 horas. A caracterização foi realizada por espectrometria no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) utilizando acessório de reflexão total atenuada (ATR), permitindo a identificação e o acompanhamento das principais bandas associadas à estrutura do PEAD e à formação de grupos oxidativos. Os resultados indicaram a manutenção da assinatura espectral característica do PEAD após o envelhecimento, com variações na intensidade das bandas. Observou-se que a borda lisa apresentou alterações espectrais mais pronunciadas, associadas ao aumento de bandas relacionadas a grupos carbonila e hidroxila, indicando maior suscetibilidade à degradação oxidativa em comparação à superfície texturizada, que apresentou maior estabilidade química ao longo do envelhecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembranas, PEAD, Durabilidade, Radiação Ultravioleta, FTIR

ABSTRACT: This study evaluates the durability of textured high-density polyethylene (HDPE) geomembranes manufactured by the blown extrusion process when subjected to ultraviolet radiation under controlled laboratory conditions. The objective was to investigate chemical changes associated with oxidative degradation processes, comparing the textured surface and the smooth edge portion of the material. Virgin and aged samples were exposed to accelerated weathering in a UV chamber equipped with UVA-340 lamps, operating under alternating irradiation and condensation cycles for exposure times of up to 2000 hours. Material characterization was performed using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) with an attenuated total reflectance (ATR) accessory, enabling the identification and monitoring of characteristic

HDPE absorption bands and oxidation-related functional groups. The results showed that the characteristic spectral signature of HDPE was preserved after aging, although variations in band intensities were observed. The smooth edge exhibited more pronounced spectral changes, particularly increases in bands associated with carbonyl and hydroxyl groups, indicating greater susceptibility to oxidative degradation. In contrast, the textured surface showed more moderate spectral variations, suggesting improved chemical stability throughout the aging process.

KEYWORDS: Geomembranes, HDPE, Durability, Ultraviolet Radiation, FTIR

1 INTRODUÇÃO

Para aplicações ambientalmente sensíveis, onde a estabilidade da estrutura depende fortemente da interação entre a geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e os demais materiais, como em obras em aterros sanitários ou mineração, a textura e coloração do material são um importante aliado (Aparicio-Ardila e Silva, 2026; Aparicio-Ardila et al., 2025a). A presença da textura permite ainda a construção de taludes mais íngremes, por exemplo, taludes laterais de 3(H):1(V) e, em alguns casos, até mais íngremes, reduzindo significativamente o risco de escorregamento das camadas de solo ou cobertura (Shukla e Yin, 2006). Já a coloração pode minimizar os efeitos da radiação e temperatura sob a superfície da geomembrana exposta (Aparicio-Ardila et al., 2025a; Aparicio-Ardila et al., 2025b).

O processo de fabricação de geomembranas texturizadas por extrusão com matriz balão é amplamente utilizado na indústria, sendo considerado o mais comum para a produção comercial desses materiais (Aparicio-Ardila, 2025). Nesse método, a resina de polietileno em forma granular é alimentada em uma extrusora, onde é plastificada, homogeneizada e então direcionada para uma matriz circular. Durante o processo, para evitar que as paredes internas do tubo se fundam, insufla-se ar sob pressão no interior, criando um balão. A formação da textura superficial está associada à taxa de extrusão e à velocidade do puxador, ocorrendo quando bolhas de nitrogênio inerte, ao se resfriarem e se romperem devido ao cisalhamento na extrusora, geram a rugosidade característica do material (Müller, 2007; Scheirs, 2009).

Em polímeros empregados na fabricação de geomembranas, a espectroscopia no infravermelho permite acompanhar alterações nas ligações carbônicas e nos grupos funcionais formados ou modificados ao longo do tempo, associadas aos processos de degradação oxidativa. Estudos mostraram que ao longo da exposição ao meio ambiente exógeno, é possível acompanhar o surgimento da banda carbonila (C=O) em polímeros (Kwon *et al.*, 2013; Curcio *et al.*, 2015; Murakami e Koga, 2016). Em pesquisas com geossintéticos, outros autores também utilizaram essa técnica (Yang e Ding, 2006; Azuma *et al.*, 2009; Valente *et al.*, 2010; Rouillon *et al.*, 2016; Dias Filho *et al.*, 2019). Dentro desses trabalhos, Rouillon *et al*, destacou a análise da banda em 1456 cm^{-1}, correspondente ao grupo metil (CH_3), como outra análise alternativa representativa para avaliar o comportamento de polipropilenos.

2 MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Geomembranas

O estudo foi realizado a partir da seleção de geomembranas texturizadas PEAD fabricadas pelo método balão, todas com espessura nominal de 2,00 mm e de cor preta, fornecidas por fabricantes sul-americanos que utilizam resinas produzidas na própria região. Foi realizada avaliação comparativa entre áreas com superfície texturizada e a porção de borda lisa, tornando possível analisar possíveis variações associadas à morfologia superficial. Antes da realização dos ensaios, verificou-se que todos os materiais atendiam aos critérios de desempenho estabelecidos pelo GRI-GM13 (2024). As etapas de caracterização utilizando amostras virgens e expostas foram executadas no Laboratório de Geossintéticos da Universidade de São Paulo (USP), em São Carlos, Brasil. Os parâmetros iniciais dos materiais analisados e os respectivos métodos de ensaio estão apresentados na Tabela 1. A Figura 1 mostra detalhes da borda lisa da amostra.



Figura 1. Detalhe da borda lisa da amostra.

Tabela 1. Propriedades iniciais das geomembranas analisadas.

Propriedade (Unidade)	**Método**	**Média ± (desvio padrão)**	
Geomembrana	-	Texturizada	Borda Lisa
Data de fabricação	-	2022	2022
Texturização	-	Dois lados	Lisa
Espessura (mm)	ASTM D5994 (2021)/D5199 (2012)	2.28 (±0.09)	1.77 (±0.07)
Altura de aspereza (mm)	ASTM D7466 (2015)	1.00 (±0.12)	-
Resistência à tração na ruptura (kN/m)	ASTM D6693 (2020)	38.63 (±1.63)	56.43 (±2.03)
Deformação na ruptura (%)		422.90 (±53.20)	723.3 (±25.39)
Resistência à tração no escoamento (kN/m)		37.31 (±0.96)	30.81 (±0.55)
Alongamento no escoamento (%)		15.50 (±0.36)	19.75 (±0.32)
Resistência à punção (N)	ASTM D4833 (2020)	838.1 (±31.47)	N.D
Resistência média ao rasgo (N)	ASTM D1004 (2021)	329.40 (±25.02)	N.D
Tempo de indução à oxidação – OIT (min)	ASTM D3895 (2023)	334.43 (±1.2)	383.71 (±1.92)

2.2 Procedimentos de câmara UV

Conforme diretrizes normativas, os ensaios de intemperismo acelerado foram realizados em uma câmara do tipo EQUV, operando com lâmpadas fluorescentes UVA-340 (Equilam, São Paulo, Brasil), o equipamento foi configurado para ciclos alternados compostos por um período prolongado de irradiação ultravioleta, mantido a 75 ºC por 20 horas, seguido por uma etapa de condensação de 4 horas a 60 ºC. Foram retiradas amostras texturizadas após 500, 1000 e 2000 horas de exposição, enquanto a amostra da borda lisa foi retirada após o período de 2000 horas. O mesmo procedimento foi realizado e discutido no trabalho de Aparicio-Ardila et al. (2025b) com geomembranas coloridas texturizadas.

2.3 Procedimentos em infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de infravermelho foram obtidos utilizando um espectrômetro equipado com acessório de ATR, contendo cristal de alta transparência adequado à região do infravermelho médio. As análises foram realizadas na faixa espectral de 4.000 a 400 cm^{-1}, que corresponde à região do MIR (Infravermelho Médio, em inglês), com resolução e sensibilidade adequadas à identificação dos grupos funcionais presentes nas geomembranas de PEAD. Além disso, análises foram realizadas com resolução espectral de 4 cm^{-1} e 64 varreduras acumuladas por espectro, a fim de aumentar a relação sinal-ruído.

Os espectros foram processados e corrigidos por meio dos métodos, presentes no software do equipamento, *Arithmetic, Baseline Correction, Normalize e Smoothing*, visando tratar dados com base matemática, alinhar as linhas de base, normalizar a intensidade das bandas e eliminar ruídos. Após o processamento, todos os espectros foram exportados em formato ASCII e posteriormente tratados no software OriginPro, utilizado para organização, comparação e análise gráfica dos dados.

A análise dos dados ocorreu utilizando o espectro de referência do PEAD, Conforme Smith (2021), as bandas mais intensas localizam-se em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1}, correspondentes, respectivamente, aos estiramentos (stretch) assimétrico e simétrico das ligações C–H do grupo metileno (CH_2). Essas absorções são

características de materiais que possuem longas cadeias de carbono e hidrogênio ligadas de forma linear, como o polietileno (Kovács *et al.*, 2021). Já as bandas em 1472 cm^{-1} e 1464 cm^{-1} estão associadas às vibrações de deformação angular (ou scissoring) das ligações C–H (Casarano, 2004), enquanto os picos em 730 cm^{-1} e 720 cm^{-1} correspondem às vibrações de balanço (rocking) do grupo CH_2. Dessa forma, estas bandas constituem a chamada "assinatura espectral" do PEAD, servindo como base para a interpretação dos espectros obtidos experimentalmente durante o trabalho. A análise dessas regiões permite verificar se o material sofreu alterações químicas ao longo do tempo ou sob diferentes condições de exposição. Além disso, analisa-se 1710 cm^{-1}, banda ligada ao grupo carbonila (C=O), e 3400 cm^{-1}, ligada a grupos hidroxila (O–H).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os espectros da análise comparando a geomembrana texturizada fabricadas pelo método de extrusão balão antes (linha verde) e após degradação em câmara UV a 500 h (linha azul), 1000 h (linha vermelha) e 2000 h (linha preta).

Os espectros da geomembrana envelhecida fabricada pelo método de extrusão balão manteve as bandas características da assinatura espectral do PEAD após envelhecimento até 2000 h e, como esperado, houveram variação de suas intensidades. O surgimento da banda de dióxido de carbono ocorreu, provavelmente, devido absorção do gás no momento do ensaio. A banda em 1710 cm^{-1}, que já continha indicativo de carbonila devido envelhecimento no armazenamento, apresentou leve aumento de intensidade e alargamento da região ao longo do envelhecimento da amostra. A banda em 3400 cm^{-1} apresentou leve aparição em 2000 h. A região entre 800 e 1200 cm^{-1}, que já estava presente na geomembrana virgem, também apresentou variações de intensidade.

A Figura 3, por sua vez, contém os espectros da análise comparando a borda lisa da geomembrana texturizada antes (linha vermelha) e após envelhecimento em câmara UV a 2000 h (linha preta).

O espectro da borda lisa da geomembrana envelhecida fabricada por extrusão balão apresentou aumento de intensidade das bandas características do PEAD, principalmente das bandas A, B e D. As bandas em 1710 cm^{-1} e 3400 cm^{-1}, que já haviam aparecido na amostra virgem, apresentaram variação. A região entre 800 e 1200 cm^{-1} obtiveram suavização de suas bandas.

Figura 2 - FTIR da geomembrana texturizada antes e após envelhecimento em câmara UV

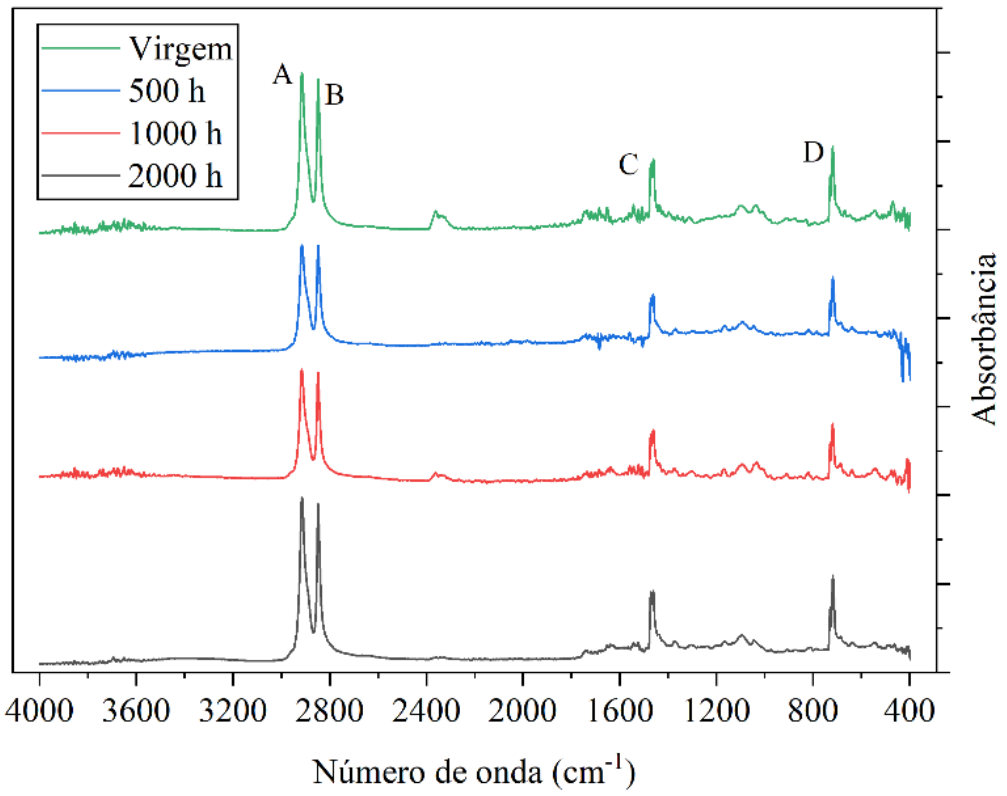
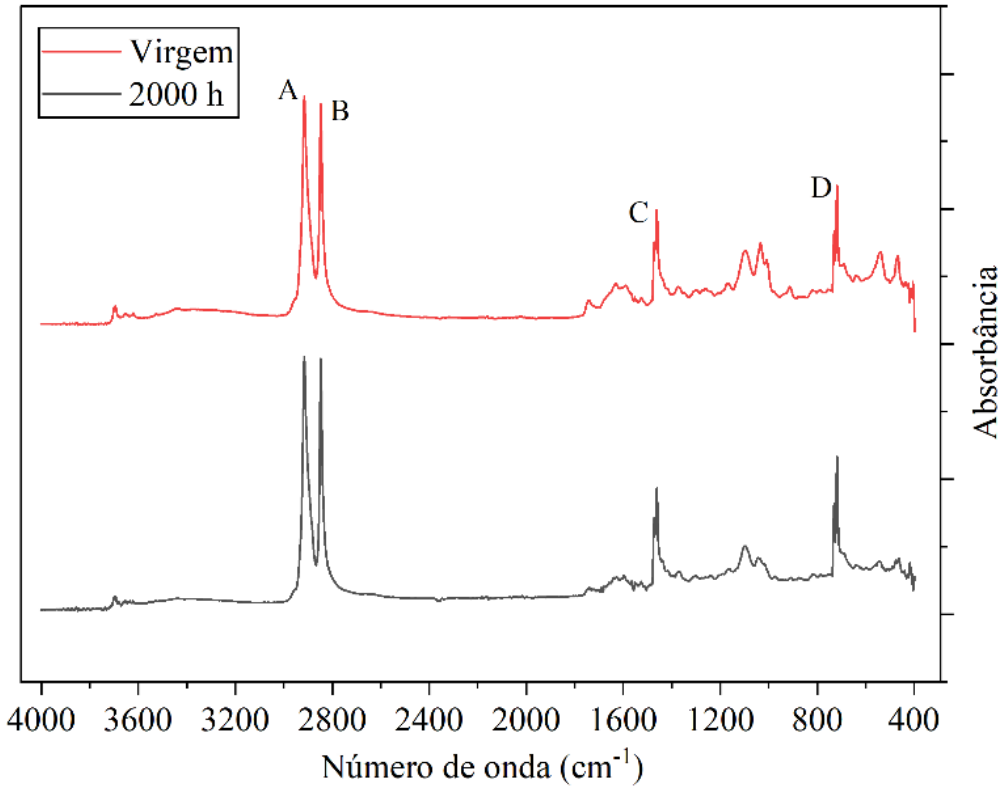


Figura 3 - FTIR da borda lisa de geomembrana antes e após envelhecimento em câmara UV



4 CONCLUSÃO

De modo geral, as variações espectrais observadas nas geomembranas corroboram a tendência apontada por Aparicio-Ardila (2025) de que a porção de borda lisa apresenta maior suscetibilidade à degradação oxidativa que a texturizada. As variações mais pronunciadas das bandas associadas a carbonilas, hidroxilas e da região 800–1200 cm^{-1} na borda lisa da geomembrana indica um processo oxidativo mais avançado e formação acelerada de produtos secundários, coerente com a maior perda de antioxidantes e avanço mais rápido nos estágios de oxidação relatados pela autora. Já a porção texturizada mostrou alterações espectrais mais moderadas ao longo do envelhecimento e maior estabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP e ao Laboratório de Química da UFOB pelo apoio técnico e infraestrutura disponibilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aparicio-Ardila, M.A. (2025) *Durability of textured HDPE geomembranes in environmental protection applications*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 118 p.

Aparicio-Ardila, M.A., Kobelnik, M., Valentin, C.A., Palomino, C.F., Sabogal-Paz, L.P., & Silva, J.L. (2025a). Natural weathering effects on white, green, and black HDPE textured GMs. *Geosynthetics International*, 32(6), 1-40. https://doi.org/10.1680/jgein.24.00150.

Aparicio-Ardila, M.A., Silva, J. L. (2026) Textured high-density polyethylene geomembranes in geotechnical and environmental engineering: an overview. *Soils and Rocks.* 49 (2) : e2026012325. https://doi.org/10.28927/SR.2026.012325

Aparicio-Ardila, M.A., Valentin, C.A., & Silva, J.L. (2025b). Colored HDPE textured geomembranes exposed to UV: laboratory insights into material degradation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 11(3), 23. https://doi.org/10.1007/s40891-025-00632-z.

ASTM International (2012). ASTM D5199: *Standard test method for measuring the nominal thickness of Geosynthetics.*

ASTM International (2015). ASTM D7466: *Standard test method for measuring the asperity height of textured geomembrane.*

ASTM International (2020). ASTM D4833: *Standard test method for index puncture resistance of geomembranes and related products.*

ASTM International (2020). ASTM D6693: *Standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes.*

ASTM International (2021). ASTM D1004: *Standard test method for tear resistance (graves tear) of plastic film and sheeting.*

ASTM International (2021). ASTM D5994: S*tandard test method for measuring core thickness of textured geomembranes.*

ASTM International (2023). ASTM D3895: *Standard test method for oxidative-induction time of polyolefins by differential scanning calorimetry.*

Azuma, Y., Takeda, H., Watanabe, S., & Nakatani, H. (2009). Outdoor and accelerated weathering tests for polypropylene and polypropylene/talc composites: A comparative study of their weathering behavior. *Polymer Degradation and Stability*, 94(12), 2267-2274.

Curcio, M. S., Oliveira, M. P., Waldman, W. R., Sánchez, B., & Canela, M. C. (2015). TiO2 sol-gel for formaldehyde photodegradation using polymeric support: photocatalysis efficiency versus material stability. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(2), 800-809. https://doi.org/10.1007/s11356-014-2683-4

Dias Filho, J. L. E., de Almeida Maia, P. C., & de Castro Xavier, G. (2019). Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4), 577-585. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.02.002.

Kwon, H. J., Lee, Y. W., Kim, H. S., Zhoh, C. K., Park, K. W., (2013) One-dimensional TiO2 nanostructures with improved UV-blocking properties. *Materials Letter*. 93 (1), 175–178.

Müller, W. (2007). *HDPE geomembranes in geotechnics* (1st ed.). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37288-2

Murakami, N., & Koga, N. (2016). In situ photoacoustic FTIR studies on photocatalytic oxidation of 2-propanol over titanium (IV) oxide. *Catalysis Communications*, 83, 1-4.

Rouillon, C., Bussiere, P. O., Desnoux, E., Collin, S., Vial, C., Therias, S., & Gardette, J. L. (2016). Is carbonyl index a quantitative probe to monitor polypropylene photodegradation?. *Polymer degradation and stability*, 128, 200-208.

Scheirs, J. (2009). *A guide to polymeric geomembranes: a practical approach*. Hoboken: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470748213.

Shukla, S. K.; Yin, J. H. (2006*) Fundamentals of geosynthetic engineering*. London: Taylor & Francis.

Valente, I. M., Carneiro, J. R., Almeida, P. J., & Lopes, M. L. (2010). Chemical studies about the durability of polypropylene geotextiles. *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics* (Vol. 2, pp. 785-788).

Yang, X.; Ding, X. Prediction of outdoor weathering performance of polypropylene filaments by accelerated weathering tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 24, n. 2, p. 103–109, 2006.