

Resistência e rigidez de geomembranas de PEAD expostas em painéis localizados em regiões brasileiras

José Luiz Ernandes Dias Filho

Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras, Brasil, jledfilho@ufob.edu.br

Clever Aparecido Valentin

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

Marta Pereira da Luz

Engenheira Civil - Eletrobras Furnas, martaluz@eletrobras.com

Professora, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil

Jefferson Lins da Silva

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

RESUMO: As geomembranas de polietileno de alta densidade são aplicadas em obras de proteção e recuperação ambiental com o objetivo de função barreira de fluidos, de modo que a integridade do produto geossintético deve ser avaliada. Este trabalho avaliou geomembranas de 0,8 e 1 mm de PEAD instaladas em painéis situados em três regiões brasileiras ao longo de 4 meses, por meio de ensaios físicos e mecânicos, a saber: densidade, espessura, teor de negro de fumo e resistência à tração. Com base na caracterização física e mecânica, foi possível quantificar que as geomembranas apresentaram variações, com maior destaque para as resistências ao escoamento e à ruptura e as rigidezes de 2, 5 e 10%. Entre os principais aspectos analisados observou-se pequenas variações nas propriedades físicas de espessura e densidade nas amostras, seja para espessura de 0,8 ou 1 mm, com valor mínimo de 97% e máximo de 107% do valor médio. Já para as propriedades mecânicas, as variações ficaram entre 78 e 136% do valor médio. Os teores de negro de fumo podem ter gerado a dispersão nos resultados e, para o período de exposição das amostras no estudo, ficou difícil a evidenciação das variáveis climáticas nas variações dos resultados obtidos. O estudo permite concluir como a espessura e os aditivos estabilizantes são importantes para as geomembranas desempenharem bem as suas funções da forma adequada e dessa forma, deixar claro a necessidade de ser cauteloso com a utilização de espessuras inferiores a 1 mm, mesmo em projetos de baixo risco ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembranas, Durabilidade, Exposição Natural.

ABSTRACT: High density polyethylene geomembranes are applied in environmental protection and recovery works with the objective of fluid barrier function, so the integrity of the geosynthetic product must be evaluated. This paper evaluated 0.8 and 1 mm HDPE geomembranes installed in panels located in three Brazilian regions over the course of 4 months, through physical and mechanical tests, namely: density, thickness, carbon black content and tensile strength. Based on the physical and mechanical characterization, it was possible to quantify that the geomembranes presented variations, with greater emphasis on resistance to flow and rupture and secant tensile stiffness at 2, 5 and 10%. Among the main aspects analyzed were small variations in the physical properties of thickness and density in the samples, whether for a thickness of 0.8 or 1 mm, with a minimum value of 97% and a maximum of 107% of the average value. As for mechanical properties, variations were between 78 and 136% of the average value. Carbon black may have generated dispersion in the results and, for the period of exposure of the samples in the study, it was difficult to highlight climatic variations in the variations in the results obtained. The study allows us to conclude how thickness and stabilizing additive content are important for geomembranes to perform their functions properly and in this way, making clear the need to be cautious with the use of thicknesses of less than 1 mm, even in projects low environmental risk.

KEYWORDS: Geomembranes, Durability, Natural Exposure

1 INTRODUÇÃO

Durante a exposição ao ar livre, os geossintéticos podem estar sujeitos às ações de vento, umidade, chuva ou radiação solar, por exposição prolongada afetando adversamente suas propriedades físicas, mecânicas e/ou hidráulicas, prejudicando as suas propriedades e encurtando a sua vida útil (Dias Filho et al, 2024). Dessa forma, a utilização de geossintéticos em projetos de engenharia vem ganhando espaço, pois se bem dimensionado a sua durabilidade é suficiente para manter suas propriedades funcionais, atendendo aos requisitos de o projeto por sua vida útil

As geomembranas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) tem se tornado cada vez mais comum em diversas aplicações na engenharia civil. Entre eles, projetos de revestimento de aterros sanitários e impermeabilização de reservatórios apresentam necessidade e importância devido às suas propriedades físico-químicas e à sua durabilidade necessárias para se desempenhar sua função (Lavoie et al, 2022; Rowe and Sangam, 2002; Abdelaal et al, 2014). No entanto, a exposição desses materiais às condições ambientais adversas típicas de diversas regiões do Brasil (Dias Filho et al, 2024) pode levar à diminuição das propriedades mecânicas, comprometendo assim a eficácia desses revestimentos.

A resistência e rigidez das geomembranas de PEAD são características fundamentais para garantir a eficácia e desempenho em aplicações geotécnicas. Essas propriedades são essenciais para garantir a integridade desses materiais ao longo do tempo. A exposição a intempéries, como radiação solar, variações térmicas e agentes químicos, pode comprometer essas propriedades, tornando necessário o estudo e a avaliação do comportamento dessas geomembranas em condições reais de exposição.

Este trabalho tem como objetivo investigar a resistência e a rigidez de geomembranas de PEAD expostas em painéis localizados em três diferentes regiões brasileiras: Itumbiara/GO, São Carlos/SP e Além Paraíba/MG (Figura 1). Serão analisadas amostras de geomembranas com espessuras de 0,8 e 1 mm submetidas a condições de intempéries representativas dessas regiões, com o intuito de avaliar os efeitos da exposição prolongada nas propriedades mecânicas desses materiais.

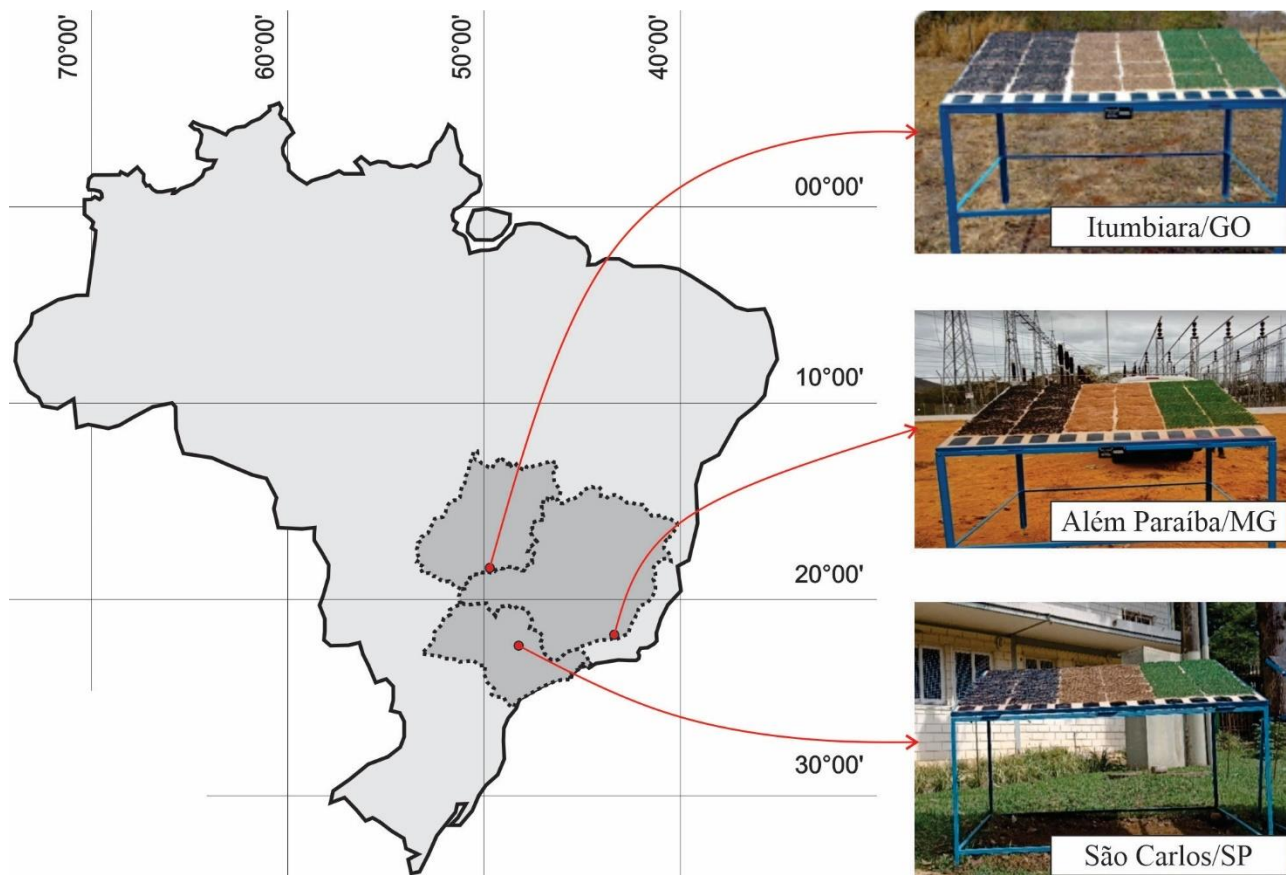


Figura 1. Painel com exposição com as geomembranas na parte inferior.

A compreensão dos fatores que influenciam a resistência e a rigidez das geomembranas de PEAD em condições ambientais brasileiras é fundamental para garantir a eficácia e a durabilidade desses materiais em aplicações geotécnicas. O presente estudo visa contribuir para o avanço nesse campo, fornecendo subsídios técnicos para a seleção e o dimensionamento adequados desses materiais em projetos de engenharia civil no Brasil. Como o local de exposição tem influência direta no seu método de degradação, o objetivo de este estudo aborda (1) a determinação de mudanças nas propriedades físicas e mecânicas das geomembranas, (2) as variações dos resultados conforme a sua espessura e (3) a influência das diferentes condições atmosféricas conforme o intemperismo local.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Geomembranas

Este estudo investiga duas geomembranas fabricadas com poli(etileno) de alta densidade (PEAD) com 0,8 e 1 mm de espessura. O material desta pesquisa contém aditivos estabilizantes para aumentar sua resistência à radiação ultravioleta. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos. Os resultados dos ensaios de caracterização das geomembranas são mostrados na Tabela 1. A tabela também indica a faixa de confiança de cada propriedade e desvio padrão.

Tabela 1. Caracterização das geomembranas de 0,8 e 1 mm.

Ensaio	Norma ASTM	0,8 mm			1 mm		
		Média	C.V.	D.P.	Média	C.V.	D.P.
Espessura (mm)	D5199	0,773	2,620	0,020	1,062	1,566	0,017
Densidade (g/cm ³)	D792	0,938	0,040	0,000	0,945	0,038	0,000
Teor de N.F. (%) (W3)	D4218	2,380	0,740	0,020	2,747	1,101	0,030
Teor de N.F. (%) (W4)		0,770	4,240	0,030	1,864	4,206	0,078
T _n a 2% def. (kN/m)	D6693	3,475	24,310	0,845	9,690	0,422	0,041
T _n a 5% def. (kN/m)		8,710	4,038	0,352	16,520	0,505	0,083
T _n a 10% def. (kN/m)		12,270	0,511	0,063	20,530	0,081	0,017
T _n Máx. (kN/m)		24,220	1,622	0,393	32,380	5,710	1,849
Def. _n Máxima (%)		1081,000	2,517	27,200	959,100	2,427	23,270
T _t a 2% def. (kN/m)	D6693	4,850	21,410	1,038	9,503	7,333	0,697
T _t a 5% def. (kN/m)		9,963	6,411	0,639	16,660	2,719	0,453
T _t a 10% def. (kN/m)		13,390	1,872	0,251	37,680	0,997	0,375
T _t Máx. (kN/m)		27,110	3,636	0,986	1188,000	0,567	6,730
Def. _t Máxima (%)		1212,000	3,020	36,310	37,680	0,997	0,375

C.V. = Coeficiente de Variação (%); D.P. = Desvio Padrão; N.F. = Negro de Fumo; T_n = Tração na direção normal; Def._n = Deformação na direção normal; T_t = Tração na transversal; Def._t = Deformação na direção transversal.

2.2 Condições ambientais

As amostras de geomembranas foram expostas a diferentes condições ambientais utilizando painéis (Figura 2) projetados seguindo as recomendações da ISO 877-1 (2009) e ISO 877-2 (2009) em três localidades no Brasil com diferentes condições climáticas (Tabela 2). Suportes foram utilizados para instalar os corpos de prova nas estruturas de exposição apropriadas, fixando-os no lugar. As inclinações dos painéis são obtidas conforme a latitude do local de exposição e sua direção é para o norte, ou seja, 21,9° para o campo experimental de Simplício, já para a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) foi 22°, enquanto Itumbiara corresponde a 17,4°. Durante o tempo de exposição, para evitar distorções ou deformações, os corpos de prova foram apoiados em uma mesa de madeira com inclinação determinada pela estrutura de metal.



Figura 2. Painel com exposição com as geomembranas na parte inferior.

Tabela 2. Características dos locais de exposição.

Painel	Elevação (m)	Cidade/Estado	Temperatura média anual (°C)		Precipitação anual média (mm)
			Máxima	Mínima	
Itumbiara	140	Itumbiara/GO	33,9	17,3	1123
EESC/USP	819	São Carlos/SP	28,4	12,6	1404
Simplício	448	Além Paraíba/MG	32	14	1159

*Climate Data (2024)

Para exposição ao intemperismo, as bordas das amostras foram grampeadas na grade do painel, desconsiderando as bordas de fixação durante o preparo da amostra. Os suportes foram orientados ao norte com inclinação baseada na latitude indicada na Tabela 2 e visualizada na Figura 1. Outros dados climáticos que caracterizam o local de exposição podem ser analisados. Por exemplo, elevada amplitude térmica pode ser observada nas cidades Itumbiara e Além Paraíba, apresentando valores de 16,6° e 18°, respectivamente. Por outro lado, São Carlos, possui apenas 15,8° de amplitude térmica, a qual se destaca também pela precipitação média anual, que foi de 1404 mm.

2.3 Programa experimental

Os danos causados às geomembranas pelo intemperismo foram avaliados comparando amostras degradadas e intactas. O programa de experimentos compreendeu na realização de caracterização das propriedades físicas e mecânica. Os ensaios que caracterizaram as propriedades físicas foram a espessura (ASTM D5199), densidade (ASTM D792) e teor de negro de fumo (ASTM D4218 - W3 e W4). Já a caracterização da propriedade mecânica foi restrita ao ensaio de tração (ASTM D669).

O ensaio de tração foi realizado em Máquina Universal de Ensaio EMIC, modelo DL 3000, utilizando garras compressivas manuais e seguindo a norma ASTM D669. Amostras foram coletadas em dois períodos distintos de 2 e 4 meses.

Cada corpo de prova foi avaliado quanto à resistência à tração e alongamento, e os resultados incluíram resistência à tração máxima (kN/m), rigidez à tração secante a 2%, 5% e 10% de deformação (kN/m) e alongamento à carga máxima (%).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta todos os resultados obtidos considerando as duas espessuras de geomembranas e os três locais de exposição.

Tabela 3. Resultados das geomembranas de 0,8 e 1 mm.

Local	Itumbiara		EESC/USP		Simplício			
Tempo (meses)	2	4	2	4	2	4		
Ensaio	M (C.V.)	M (C.V.)	M (C.V.)	M (C.V.)	M (C.V.)	M (C.V.)		
0,8 mm	E	0.769(1.21)	0.774(0.81)	0.777(1.61)	0.772(1.99)	0.787(0.57)	0.791(1.13)	
	D	0.94(0.21)	0.938(0.11)	0.941(0.1)	0.938(0.03)	0.941(0.08)	0.938(0.03)	
	N.F. (W3)	2.17(2.07)	2.55(6.54)	2.499(1.61)	1.997(1.31)	2.323(3.26)	2.288(4.39)	
	N.F. (W4)	1.26(1.94)	1.11(20.22)	1.294(1.44)	0.454(1.73)	1.24(19.02)	1.211(5.19)	
	T _n 2% def.	4.108(14.69)	4.2(11.14)	4.632(16.06)	4.739(3.69)	4.686(4.34)	3.949(10.81)	
	T _n a 5% def.	8.518(10.26)	8.401(7.74)	9.282(3.88)	8.722(9.35)	9.389(3.58)	8.323(1.87)	
	T _n a 10% def.	11.57(7.719)	11.24(3.548)	12.4(0.97)	11.44(7.21)	12.39(3.98)	11.42(2.7)	
	T _n Máx.	24.92(6.73)	24.24(11.61)	23.3(5.87)	24.35(13.52)	26.89(9.05)	24.16(10.51)	
	Def. _n Máxima	1140(7.046)	1144(9.877)	1053(4.47)	1124(12.73)	1188(5.31)	1100(6.93)	
	T _t a 2% def.	4.278(6.151)	4.413(12.62)	5.266(4.18)	4.754(14.04)	5.143(4.9)	3.939(16.98)	
	T _t a 5% def.	8.406(3.171)	9.11(2.998)	9.939(3.36)	9.222(2.21)	9.575(1.23)	8.323(7.94)	
	T _t a 10% def.	11.32(5.089)	12.34(0.2871)	12.92(3.03)	12.43(2.03)	12.56(0.28)	11.63(4.61)	
	T _t Máx.	22.38(36.26)	24.79(23.12)	24.52(5.68)	28.03(5.48)	28.32(5.81)	26.4(6)	
	Def. _t Máxima	1051(31.95)	1149(18.09)	1151(5.49)	1261(2.9)	1304(0.88)	1222(4.05)	
	1 mm	E	0.769(1.21)	0.774(0.81)	0.777(1.61)	0.772(1.99)	0.787(0.57)	0.791(1.13)
		D	0.94(0.21)	0.938(0.11)	0.941(0.1)	0.938(0.03)	0.941(0.08)	0.938(0.03)
N.F. (W3)		2.17(2.07)	2.55(6.54)	2.499(1.61)	1.997(1.31)	2.323(3.26)	2.288(4.39)	
N.F. (W4)		1.26(1.94)	1.11(20.22)	1.294(1.44)	0.454(1.73)	1.24(19.02)	1.211(5.19)	
T _n 2% def.		4.108(14.69)	4.2(11.14)	4.632(16.06)	4.739(3.69)	4.686(4.34)	3.949(10.81)	
T _n a 5% def.		8.518(10.26)	8.401(7.74)	9.282(3.88)	8.722(9.35)	9.389(3.58)	8.323(1.87)	
T _n a 10% def.		11.57(7.719)	11.24(3.548)	12.4(0.97)	11.44(7.21)	12.39(3.98)	11.42(2.7)	
T _n Máx.		24.92(6.73)	24.24(11.61)	23.3(5.87)	24.35(13.52)	26.89(9.05)	24.16(10.51)	
Def. _n Máxima		1140(7.046)	1144(9.877)	1053(4.47)	1124(12.73)	1188(5.31)	1100(6.93)	
T _t a 2% def.		4.278(6.151)	4.413(12.62)	5.266(4.18)	4.754(14.04)	5.143(4.9)	3.939(16.98)	
T _t a 5% def.		8.406(3.171)	9.11(2.998)	9.939(3.36)	9.222(2.21)	9.575(1.23)	8.323(7.94)	
T _t a 10% def.		11.32(5.089)	12.34(0.2871)	12.92(3.03)	12.43(2.03)	12.56(0.28)	11.63(4.61)	
T _t Máx.		22.38(36.26)	24.79(23.12)	24.52(5.68)	28.03(5.48)	28.32(5.81)	26.4(6)	
Def. _t Máxima		1051(31.95)	1149(18.09)	1151(5.49)	1261(2.9)	1304(0.88)	1222(4.05)	

C.V. = Coeficiente de Variação (%); E = espessura (mm); D = Densidade (g/cm³); N.F. = Negro de Fumo (%); T_n = Tração na direção normal (kN/m); Def._n = Deformação na direção normal (%); T_t = Tração na transversal; Def._t = Deformação na direção transversal.

Conforme a tabela apresentou, pequenas variações nas propriedades físicas com mínimo de 97% e máximo de 107% do valor médio podem ser observadas. O menor valor foi identificado na amostra de 1 mm com 4 meses de degradação em São Carlos e o maior na amostra de 1 mm com 4 meses de degradação em Simplício. Analisando criticamente os dados, não há indicativo de tendência na variação entre a amostra virgem para as degradadas em 2 e 4 meses. Mesmo os coeficientes de variação inferiores a 10% fazem-se necessário esperar os próximos ensaios em tempo de degradação maiores.

Já para as propriedades mecânicas, as variações ficaram entre 78 e 136% do valor médio. Especificamente analisando a tração máxima, este valor fica entre 83-104% para amostras de 0,8 mm e 90-100% para amostras de 1 mm. Diferentemente das propriedades físicas, as mecânicas apresentaram diferença significativa nas variações, mas sem tendência definida ao longo do tempo.

Por fim, o parâmetro mais impactante para a análise dos resultados foram as variações de NF que ficaram entre 59% e 188% do valor médio. Esses valores podem ser um indicativo de elevada dispersão do estabilizante e, conseqüentemente com grande potencial de interferir nos resultados. Aliado a uma quantidade de amostras reduzidas, tem-se então a necessidade de realizar o ensaio de dispersão de N.F.

Resumidamente, não houve variação significativa dos resultados de espessura e densidade, diferentemente do ensaio de resistência à tração, onde são observados reduções ou aumentos pontuais nos ensaios, seja conforme a espessura ou local de exposição.

4 CONCLUSÕES

O artigo apresentou um estudo inicial sobre a variação de propriedades físicas e mecânicas de geomembranas PEAD expostas em painéis localizados três regiões Brasileiras distintas considerando 4 meses de degradação das amostras em campo. Entre as principais conclusões tem-se:

(1) Sobre as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas das geomembranas, observou-se significativas variações nos resultados do ensaio de tração, o que pode ser em decorrência tanto das variáveis climáticas, quanto a variações do teor de N.F. obtidos nos ensaios. Especificamente, os ensaios de espessura e densidade pouco variaram.

(2) As variações dos resultados conforme a espessura das geomembranas evidenciaram reduções maiores da resistência considerando 0,8 mm espessura, o que demonstra a necessidade de se avaliar cuidadosamente a escolha deste material conforme o projeto e seu dimensionamento.

(3) De acordo com as características da geomembrana estudada e seu teor de N.F., a influência das diferentes condições atmosféricas, conforme o intemperismo local, não foi uma variável analisada com detalhamento, uma vez que as diferenças nos resultados são diretamente influenciadas pelo estabilizante, o qual apresentou variações importantes, sendo necessário, dessa forma, análise da sua dispersão antes mesmo da avaliação da condição do intemperismo ao longo dos 4 meses.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pelo Projeto Universal CNPq - Processo: 422116/2023-8: Durabilidade de geossintéticos sob diferentes envelhecimentos naturais e acelerados condições. Agradecimento também pelo financiamento e suporte de Furnas Centrais Elétricas (Furnas) - Processo DL.CSAQ.G.00008.2021. Os autores também agradecem ao Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelo apoio prestado à pesquisa e atividades relatadas neste artigo, bem como a parceria com a Universidade Federal do Oeste da Bahia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International (2019). ASTM D5199: Standard Test Methods for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.

ASTM International (2020). ASTM D4218: Standard Test Method for Determination of Carbon Black Content in Polyethylene Compounds by the Mue-Furnace Technique.

- ASTM International (2020). ASTM D6693: Standard Test Methods for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 5.
- ASTM International (2020). ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.
- Climate Data (2024) DADOS CLIMÁTICOS PARA CIDADES MUNDIAIS. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/>>. Acesso em: 15 março. 2024.
- F.B. Abdelaal, R.K. Rowe, M.Z. Islam, Effect of leachate composition on the long-term performance of a HDPE geomembrane, *Geotext. Geomembranes* 42 (2014) 348–362, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.06.001>.
- F.L. Lavoie, M. Kobelnik, C.A. Valentin, E.F. da Silva Tirelli, J. Lins da Silva, M. de Lurdes Lopes, Evaluation of exhumed HDPE geomembranes used as a liner in Brazilian shrimp farming ponds, *Case Stud. Constr. Mater.* 16 (2022) e00809, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00809>.
- ISO (2009). ISO 877-1: Plastics – methods of exposure to solar radiation. In: Part 1: General guidance.
- ISO (2009). ISO 877-2: Plastics – methods of exposure to solar radiation. In: Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass.
- J. L. E.Dias Filho, J. L.Silva, C. A.Valentin, M. P.Fleury, M. A.Aparicio-Ardila, D. M.Vidal, C. M. L.Costa, Natural weathering effects of nonwoven geotextile exposed to different climate conditions. *Geosynthetics International*, <https://doi.org/10.1680/jgein.23.00156>
- L.D. Suits, Y.G. Hsuan, Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer, *Geotext. Geomembranes* 21 (2003) 111–122, [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(02\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(02)00068-7).