

ESTUDO DA DURABILIDADE DE GEOMEMBRANAS DE PEAD IMERSAS EM ÁGUA CLORADA

Leticia Cilira Xavier Pereira ¹; Fernando Luiz Lavoie ²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este trabalho visou montar o experimento para avaliar quatro amostras de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) expostas em água clorada com concentração de 5 ppm de cloro ativo. As geomembranas possuem muitas aplicações, entre elas a utilização como barreiras em obras ambientais, principalmente de tratamento de água potável onde as geomembranas ficam em contato direto com a água clorada, podendo sofrendo degradação, fissuração e perda das suas propriedades físicas e mecânicas, deixando assim de exercer seu papel de proteção ambiental. Acerca disso, esta pesquisa realizou a caracterização física em laboratório de quatro amostras virgens de geomembranas lisas e texturizadas de 1,5 mm e 2,0 mm de espessura para posteriormente comparar suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas com as amostras envelhecidas após 6 meses e 1 ano em água clorada.*

Introdução

O uso de materiais naturais utilizados para melhorar o solo vem desde 3.000 a.C., porém o uso de materiais sintéticos foi se popularizando no Brasil só a partir da década de 1970. Deste período até os dias de hoje, o uso de geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) vem ganhando espaço na construção civil (VERTEMATTI, 2015). No entanto, durante a vida útil deste material, diversos tipos de solicitações podem ocorrer e, juntamente com reações químicas, acaba por gerar uma ruptura precoce do material, podendo causar graves danos ambientais.

Existem vários tipos de geossintéticos como geobarras, geotêxtil, georrede e geomembranas, esses materiais podem ser utilizados para reforço de um maciço de solo, drenagem de fluidos, filtração e principalmente barreiras de fluxo. Tais aplicações possuem suma importância em obras ambientais como aterros sanitários e barragens de rejeito e, também, em obras de saneamento como lagoas de tratamento de água (LAVOIE et al., 2020a).

As principais vantagens do uso da geomembrana de PEAD que fazem com que sejam muito utilizadas em obras são a alta resistência química e mecânica, além do baixo coeficiente de permeabilidade e baixo custo de produção (LAVOIE et al., 2020b).

Abdelaal et al. (2019) relataram que atualmente existem várias pesquisas sobre a durabilidade da geomembrana de PEAD, porém, essas pesquisas geralmente são estudos da geomembranas em contato com chorume artificial, tendo assim poucos estudos relacionados à geomembrana em contato com soluções cloradas, como constatamos em pesquisa nas bases de dados Science Direct, Scopus, SciElo, Periódicos Capes e Biblioteca digital de teses e dissertações. Por isso, esta pesquisa visa investigar o comportamento de amostras de geomembranas de PEAD virgens imersas em água clorada, a fim de aplicar esses geossintéticos de maneira adequada na construção de lagoas de tratamento de água.

Levando em conta que água é um dos recursos naturais mais utilizados pelo ser humano e o seu consumo é primordial para nossa sobrevivência, percebe-se um aumento de estações de tratamento de água, para essas estações é importante utilizar materiais adequados na formação de suas lagoas artificiais, a geomembrana de PEAD é um excelente exemplo, com sua baixíssima permeabilidade garante o estoque de água e a proteção do solo.

Entretanto, estudos realizados por Abdelaal e Rowe (2019) sobre a durabilidade da geomembrana de PEAD imersas em água clorada, com diferentes concentrações (0,5, 1,0, 2,5 e 5,0 ppm) e diferentes temperaturas (25, 40, 65, 75 e 85 °C) indicam uma rápida degradação

do material depois de submeter as amostras em todas as quatro concentrações, exceto em temperatura baixa (25 °C). Além disso, suas propriedades como tração e *stress cracking* diminuiriam sensivelmente.

Acerca de assegurar uma melhor vida útil da geomembrana para uso em lagoas de tratamento de água, serão realizados ensaios com quatro amostras de geomembranas virgens e texturizadas imersas em água clorada, com espessuras de 1,5 e 2,0 mm, de forma a entender o comportamento dos produtos para este tipo de aplicação.

Material e Métodos

Para esse experimento foi utilizado geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) vindos do laboratório de geossintéticos da Universidade de São Carlos (Ufscar).

As geomembranas virgens foram caracterizadas fisicamente pelos ensaios descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaios realizados para a caracterização das geomembranas de PEAD

Propriedade	Unidade	Norma
Espessura	mm	ASTM D5199/5994
Densidade	g/cm ³	ASTM D792
Dispersão de Negro de Fumo	Categoria	ASTM D5596
Teor de Negro de Fumo	%	ASTM D4218
Resistência à Tração na Ruptura	kN/m	ASTM D6693
Alongamento à Tração na Ruptura	%	ASTM D6693
OIT Padrão	min	ASTM D8117
OIT Alta Pressão	min	ASTM D5885
Resistência à Rasgo na Ruptura	N	ASTM D1004
Resistência à Punção na Ruptura	N	ASTM D4833
Resistência ao Stress Cracking	h	ASTM D5397

O ensaio de espessura segue a norma ASTM D5199 para as geomembranas lisas e a ASTM D5994 para as geomembranas texturizadas. O ensaio é feito utilizando um relógio comparador e uma sapata que aplica uma tensão de 200 kPa sobre o corpo de prova de geomembrana. Primeiramente é feita uma medição sem o corpo de prova e em seguida é feita a medição com o corpo de prova, a diferença dessas medições resulta na espessura da geomembrana.

O ensaio de densidade (ASTM D792) foi realizado através do princípio de Arquimedes, que mede a massa da amostra seca e em seguida a massa da amostra imersa em um fluido. Como a geomembrana de PEAD possui a densidade menor que a densidade da água (densidade PEAD é 0,950 g/cm³, é utilizado um líquido com densidade menor, neste caso foi álcool isopropílico (densidade 0,841 g/cm³).

O ensaio de teor de negro de fumo, que segue a norma ASTM D4218, é medido quando se coloca a geomembrana em um forno a 600 °C, por cerca de 15 min, para queimar todo o PEAD, sobrando apenas o negro de fumo. A medição da massa da amostra é feita antes desse processo e depois de finalizado para a medida da massa percentual que o negro de fumo representa na geomembrana. Esse aditivo negro de fumo é adicionado na geomembrana com a finalidade de aumentar sua resistência à radiação ultravioleta. Por conta disso é realizado o ensaio de dispersão de negro de fumo (ASTM D5596), onde mede-se o grau de dispersão dos pigmentos através de um microscópio.

O índice de fluidez, executado pela norma ASTM D1238, é medido através da extrusão da amostra. Inicialmente são inseridos alguns pedaços da geomembrana no equipamento a 190

°C, em seguida é aplicada uma carga de 5 kg por 10 min, assim o material será extrusado. Quanto mais viscoso o material, menor será a massa coletada ao longo do tempo.

O ensaio mecânico de tração é um dos mais importantes ensaios realizados. Nesse ensaio é retirado um corpo de prova, em formato de osso de cachorro. O ensaio é realizado em uma máquina universal de ensaios com velocidade determinada pela norma ASTM D6693. O comportamento da curva tensão deformação mostra o primeiro pico, denominado de pico de escoamento, seguido pelo segundo pico, denominado de pico de ruptura da amostra.

Outros dois ensaios mecânicos secundários realizados são a resistência ao rasgo (ASTM D1004) e resistência à punção (ASTM D4833). No ensaio de rasgo o corpo de prova em forma de “V” é fixado na máquina universal de ensaios para medir a força necessária para induzir o rasgo do material. Já no ensaio de punção o corpo de prova é extraído em forma circular e é aplicada uma força de compressão para romper o corpo de prova. Esses ensaios não permitem prever o comportamento da geomembrana exposta, mas são importantes para a caracterização da amostra.

Os ensaios térmicos para verificar a quantidade de antioxidantes na amostra são denominados de OIT (*oxidative-induction time*) (ASTM D8117 e ASTM D5885). O primeiro ensaio é chamado de OIT Padrão, esse ensaio começa elevando a temperatura até 200 °C com uma atmosfera de nitrogênio (inerte), após atingir essa temperatura é trocado o gás para oxigênio, induzindo o consumo dos antioxidantes da amostra medido pelo tempo. Estes antioxidantes protegem o polímero da oxidação. O segundo ensaio é o OIT alta pressão, tem o mesmo princípio do anterior, porém é com uma temperatura mais baixa, de 150 °C, e entra com o gás oxigênio com alta pressão, medindo o tempo de oxidação. A diferença dos ensaios é que como são inseridos diferentes grupos de antioxidantes no pacote de aditivos da geomembrana, cada um trabalha em diferentes faixas de temperatura, ambos os ensaios buscam medir os tempos de oxidação para os diferentes tipos de antioxidantes.

O último ensaio realizado é o *Stress Cracking* (SCR), norma ASTM D5397 que é um ensaio de desempenho. Nesta metodologia são simuladas algumas condições, a primeira é o dano onde se mede a espessura da geomembrana e é feita uma ranhura de 20 % da espessura do corpo de prova, em seguida é aplicada uma carga constante de 30 % da resistência ao escoamento da geomembrana. O corpo de prova é então imerso em uma solução de Igepal CO 630 (10 % de Igepal e 90 % de água destilada), que é um detergente não iônico e não desnaturante, a 50 °C (para simular o contato da geomembrana com algum líquido químico reagindo). Por fim é medido o tempo para romper essa geomembrana nestas condições de contorno.

Para a realização deste experimento, foram utilizadas 4 amostras de geomembranas virgens de polietileno de alta densidade (PEAD), de duas espessuras diferentes, com as faces lisas e texturizadas, denominadas de GM 1,5L (1,5 mm com as duas faces lisas), GM 2L (2,0 mm com as duas faces lisas), GM Text 1,5L (1,5 mm com as duas faces texturizadas), e GM Text 2L (2,0 mm com as duas faces texturizadas). Essas amostras foram submersas em uma solução de água clorada com 5 ppm de cloro ativo e mantidas em uma estufa e uma cuba para ser controlado a temperatura. A cuba está a uma temperatura ambiente, cerca de 23 °C, já a estufa está a uma temperatura elevada (85 °C). Desta forma será possível realizar a comparação do efeito da temperatura no envelhecimento da geomembrana. O período que essas amostras ficarão em exposição serão de 6 meses e 1 ano.

Foram utilizados 16 recipientes, 6 potes de 2L e 10 potes de 3,5L, nos quais foram inseridas 2 amostras de geomembranas de dimensões 10,5 x 14,5 cm por pote, como mostrado na Figura 1.



(a)



(b)

Figura 1- (a) GM 1,5L dimensões 10,5 x 14,5 cm; (b) GM Text 1,5L dimensões 10,5 x 14,5 cm

O preparo da solução foi feito utilizando hipoclorito de sódio com concentração de 10-12 %, água destilada e uma pipeta eletrônica, pois nos 45 litros utilizados no total a concentração de cloro é relativamente baixa. A Figura 2 mostra a pipeta utilizada na preparação da solução e a preparação da solução.



(a)



(b)

Figura 2 – (a) Pipeta eletrônica com alta precisão; (b) Inserção do cloro na água

Para garantir que as amostras ficassem em contato somente com a solução em ambas as faces durante todo o tempo de exposição, foi feito um estudo de materiais que suportariam ficar muito tempo em água clorada, que não contaminassem a solução e que suportassem altas temperaturas. Por este motivo foi utilizada a própria geomembrana de PEAD para fazer um suporte e manter uma distância das geomembranas. Esse suporte tem formato de “T” invertido para segurar cada amostra em seu lugar, como é mostrado na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3 – (a) Partes do suporte das geomembranas; (b) Suporte montado das geomembranas

Portanto a montagem final do experimento ficou como demonstrado na Figura 4.



Figura 4 – Montagem final do experimento

Após a montagem dos potes com o suporte e a solução, as amostras foram colocadas em duas cubas a 23 °C e em uma estufa a 85 °C, como demonstrado na Figura 5.



(a)



(b)

Figura 5 – (a) Experimento montado na cuba (23 °C); (b) Experimento montado na estufa (85 °C)

Dessa forma os ensaios a serem realizados com as geomembranas expostas, após 6 meses e 1 ano, serão o ensaio mecânico de tração, ensaios de OIT, índice de fluidez, *stress cracking* e ensaios térmicos.

Resultados e Discussão

Os resultados apresentados a seguir são os ensaios realizados nas amostras de geomembranas de PEAD virgens.

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios físicos de espessura, densidade, índice de fluidez, teor de negro de fumo e dispersão de negro de fumo das amostras virgens.

Tabela 2 – Ensaio físicos realizados nas amostras de geomembranas de PEAD virgens

Amostra	Espessura (mm)	Densidade (g/cm ³)	Índice de Fluidez (g/10 min)	Teor de Negro de Fumo (%)	Dispersão de Negro de Fumo (Categoria)
GM 1,5L	1,652 (±0,039)	0,945 (±0,001)	0,5054 (±0,0102)	2,92 (±0,12)	Categoria I
GM 2L	1,984 (±0,061)	0,948 (±0,001)	0,4406 (±0,0067)	2,27 (±0,09)	Categoria I
GM Text 1,5L	1,653 (±0,039)	0,943 (±0,001)	0,4491 (±0,0103)	2,36 (±0,27)	Categoria I
GM Text 2L	2,371 (±0,020)	0,944 (±0,001)	0,4380 (±0,0040)	2,22 (±0,02)	Categoria I

O desvio padrão dos resultados de cada ensaio está apresentado entre parênteses.

Comparando os ensaios da Tabela 2 com a norma americana GRI-GM-13, que prescreve os valores mínimos das propriedades relevantes a serem controladas no controle de qualidade de fabricação de geomembranas de PEAD, é possível concluir que as amostras virgens atendem os valores mínimos da norma americana. Apenas a amostra GM 2L apresentou um valor de espessura ligeiramente inferior ao valor nominal.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de consumo de antioxidantes (ensaio OIT) e *stress cracking* (SCR) das amostras virgens.

Tabela 3 – Ensaio OIT realizados nas amostras de geomembranas de PEAD virgens

Amostra	OIT Padrão (min)	OIT Alta Pressão (min)	SCR (h)
GM 1,5L	199,78 (± 4,03)	287,25 (± 1,06)	629,84 (± 67,55)
GM 2L	113,80 (± 5,32)	241,50 (± 5,37)	319,73 (± 31,25)
GM Text 1,5L	170,62 (± 0,74)	238,10 (± 24,18)	928,59 (± 74,42)
GM Text 2L	181,33 (± 3,71)	322,40 (± 13,29)	414,24 (± 55,83)

O desvio padrão dos resultados de cada ensaio está apresentado entre parênteses.

Com os resultados da Tabela 3 é possível notar que em relação ao ensaio OIT Alta Pressão, nenhuma amostra obedece a norma americana GRI-GM-13 que determina 400 min como o mínimo que a amostra tem que suportar. Além disso, no ensaio SCR, as amostras de 2,0 mm, tanto lisa quanto texturizada, não obedecem a norma americana que determina 500 h como tempo mínimo a resistir antes da ruptura.

A Tabela 4 mostra os ensaios mecânicos de resistência à tração, alongamento à tração, resistência ao rasgo e resistência à punção das amostras virgens.

Tabela 4 – Ensaio mecânicos realizados nas amostras de geomembranas de PEAD virgens

Amostra	Resist. Tração (kN/m)	Along. Tração (%)	Resist. Rasgo (N)	Resist. Punção (N)
GM 1,5L	46,93 (±7,04)	704,67 (±101,30)	242,53 (±0,40)	677,30 (±16,47)
GM 2L	59,68 (±4,59)	820,03 (±33,63)	296,27 (±8,14)	788,37 (±5,99)
GM Text 1,5L	41,74 (±2,68)	518,30 (±35,52)	277,47 (±10,61)	745,70 (±13,37)
GM Text 2L	53,05 (±1,93)	523,50 (±17,47)	389,10 (±7,47)	981,87 (±12,95)

O desvio padrão dos resultados de cada ensaio está apresentado entre parênteses.

Os resultados apresentados na Tabela 4 e comparados com a norma GRI-GM-13 mostra que as amostras virgens apresentam resistência superior do que o exigido pela norma, atendendo aos requisitos mínimos mecânicos, que são, para o ensaio de Resistência à Tração da geomembrana lisa de 1,5 mm, 2,0 mm, 1,5 mm Text e 2,0 Text, 40 kN/m, 53 kN/m, 16 kN/m e 21 kN/m, respectivamente. Já para o ensaio de Alongamento a Tração o mínimo a resistir são 700%, 700%, 100% e 100%. Para o ensaio de Resistência ao Rasgo tem-se como mínimos 187 N, 249 N, 187 N e 249 N. Por fim os mínimos do ensaio de Resistência à Punção são 480 N, 640 N, 400 N e 534 N.

Conclusões

O trabalho apresentado visou a importância do estudo da durabilidade de geomembrana de PEAD em água clorada, tal estudo poderá contribuir para prever o comportamento da geomembrana em uma solução química usada em obras sanitárias, principalmente em obras de estação de tratamento de água, na qual a geomembrana é exposta diretamente com a água com clorada.

Foi realizado um planejamento para a montagem do experimento, de tal forma que todas as amostras ficassem 100 % em contato com a solução sem contaminação do sistema.

A caracterização das amostras virgens foi realizada por meio dos ensaios físicos. As amostras, quando comparadas com os requisitos mínimos prescritos na norma GRI-GM-13 mostraram comportamento inicial adequado.

Após 6 meses e 1 ano de exposição das amostras na solução, novos ensaios físicos e térmicos serão realizados para a comparação com os resultados das amostras virgens, podendo assim analisar a retenção das principais propriedades da geomembrana de PEAD.

Referências Bibliográficas

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D792 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 6.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D1004 Standard Test Methods for Tear Resistance (Graves Tear) of Plastic Film and Sheeting; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2021; p. 5.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D1238 Standard Test Methods for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 16.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D3895 Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2019; p. 7.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D4218 Standard Test Method for Determination of Carbon Black Content in Polyethylene Compounds by the Mue-Furnace Technique; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 4.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D4833 Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 4.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D5199 Standard Test Methods for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2019; p. 4.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D5397 Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 7.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D5596 Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2016; p. 3.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D5885 Standard Test Method for Oxidative Induction Time of Polyolefin Geosynthetics by High-Pressure Differential Scanning Calorimetry; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2020; p. 5.

ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D5994 Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2015; p. 4.

ASTM (American Society for Testing and Materials). 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.

ABDELAAL, F. B.; MORSY, M. S.; ROWE, R. Kerry. Long-term performance of a HDPE geomembrane stabilized with HALS in chlorinated water. **Geotextiles and Geomembranes**, [S. l.], v. 47, n. 6, p. 815–830, 2019. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2019.103497. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266114419300883>.

ABDELAAL, F. B.; ROWE, R. K. Degradation of an HDPE geomembrane without HALS in chlorinated water. **Geosynthetics International**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 354–370, 2019. DOI: 10.1680/jgein.19.00016. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/jgein.19.00016>.

GRI—GM13: Test methods, test properties, and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes SM. Geosynthetic Institute (2021)

LAVOIE, Fernando; KOBELNIK, Marcelo; VALENTIN, Clever; DA SILVA, Jefferson. DURABILITY OF HDPE GEOMEMBRANES: AN OVERVIEW. **Química Nova**, [S. l.], 2020. a. DOI: 10.21577/0100-4042.20170540. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=9091&nomeArquivo=AG20190474.pdf.

LAVOIE, Fernando Luiz; VALENTIN, Clever Aparecido; KOBELNIK, Marcelo; LINS DA SILVA, Jefferson; LOPES, Maria de Lurdes. HDPE Geomembranes for Environmental Protection: Two Case Studies. **Sustainability**, [S. l.], v. 12, n. 20, p. 8682, 2020. b. DOI: 10.3390/su12208682. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8682>.

VERTEMATTI, José Carlos. **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015