

CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE GEOMEMBRANA DE PEAD EXUMADAS *IN SITU*

Nathalie Kimie Teraoka Cury Calia 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 investigou o desempenho de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) utilizadas como barreiras de fluxo em obras geotécnicas. As geomembranas estão sujeitas a degradação, fissuração, perda da propriedade estanque, deixando de exercer sua função. Neste contexto, foi realizada a caracterização em laboratório de amostras de geomembrana de PEAD exumadas in situ aplicadas em diferentes obras geotécnicas e, a partir dos resultados obtidos, avaliar o nível de degradação das amostras. As amostras têm tempos de exposição in situ variando de 2 a 15 anos e duas diferentes espessuras nominais (0,8 mm e 1,0 mm). Foram realizados ensaios físicos, mecânicos e de desempenho. O expressivo valor de índice de fluidez da amostra exumada CAM1 indica ocorrência de degradação oxidativa na geomembrana. Os resultados obtidos mostram que as amostras CLIQ, MIN, MIN2, LDO e CAM2 apresentaram comportamento mecânico frágil, ou seja, valores abaixo do requerido pela norma de resistência ao alongamento à tração na ruptura. As amostras CAM, CAM1, MIN, MIN2 e LDO apresentaram baixos valores de resistência ao stress cracking (SC). As amostras CAM1 e LDO mostraram os piores comportamentos ao SC entre todas as amostras avaliadas neste trabalho, corroborando com os comportamentos apresentados no ensaio de tração.*

Introdução

Os materiais geossintéticos foram inseridos no mercado da engenharia civil em meados de 1970 com a finalidade de substituir métodos tradicionais com materiais naturais até então utilizados. No Brasil, seu uso se disseminou nos últimos 20 anos. Por exemplo, os aterros sanitários brasileiros recebem os resíduos de forma bruta, ou seja, sem tratamento prévio (MARQUES, 2003). Inicialmente a impermeabilização era realizada por meio de uma CCL (camada de argila compactada), ou seja, um solo compactado com baixa permeabilidade. Este método não tem propriedades adequadas de barreira de fluxo para impedir a percolação de lixiviado e garantir total estanqueidade do sistema. Desta forma, as camadas de argila compactada foram gradativamente substituídas por métodos mais eficientes e inovadores com maior resistência química a favor da proteção ambiental, por exemplo, os geossintéticos (LAVOIE, 2016).

O advento das geomembranas modificaram o sistema de impermeabilização por trazerem vantagens ao meio ambiente graças a sua baixa permeabilidade, tais como, redução da percolação de líquidos e gases e maior capacidade estanque. Assim como, controle de qualidade do material manufaturado, maior facilidade de instalação, menor custo de mão de obra e ganho no volume útil das obras, devido a sua baixa espessura (VILAR, 2003; LAVOIE, 2016).

A geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) é um geossintético com baixa permeabilidade que forma um sistema de contenção e impermeabilização de resíduos sólidos e líquidos. De acordo com Koerner (2005), a geomembrana de PEAD é o produto mais utilizado mundialmente para constituir um sistema de barreiras de fluxo. São utilizadas como revestimento de base em aterros sanitários, lagoas de efluentes industriais, tratamento de chorume, água e esgoto (VILAR, 2003). A Figura 1 mostra uma lagoa de água industrial revestida com geomembrana de PEAD com 1,0 mm de espessura exposta por 2,25 anos e a Figura 2 apresenta a mesma lagoa revestida com nova geomembrana de PEAD.



Figura 2 – Lagoa de água industrial revestida com geomembrana antiga
Fonte: Fernando Luiz Lavoie (2019)



Figura 2 - Lagoa de água industrial revestida com nova geomembrana

Em obras geotécnicas a geomembrana está exposta a diversos processos de degradação que podem levar a perda das suas propriedades mecânicas. Dentre elas destacam-se a degradação oxidativa, degradação UV (radiação ultravioleta), degradação térmica, degradação química e biológica, ou uma combinação desses fatores (ROWE e SANGAM, 2002; KAY et al., 2004). Além disso, as geomembranas de PEAD estão sujeitas ao fenômeno de *stress cracking* (SC). De acordo com Wright (1996), o SC ocorre com o início precoce de fissuras em materiais plásticos, devido a combinação de ações de tensões, deformações e contato com agentes agressivos, simultaneamente. A ASTM D883 (2020) define o fenômeno de SC como “uma ruptura interna ou externa causada por tensões de tração menores que sua resistência mecânica num curto espaço de tempo”.

O processo de degradação e o surgimento de fissuras nas geomembranas tem início com exposição por longos períodos aos efeitos da intempérie, alterando a composição do material. Neste caso, ocorre a degradação térmica e UV formando radicais livres e conduzindo a degradação oxidativa. Efeitos sinérgicos aumentam o grau de degradação do material quando sujeitos a elevadas temperaturas e tensões mecânicas por tempo prolongado (KOERNER et al. 1992). Além dos efeitos de degradação, a geomembrana de PEAD é um polímero termoplástico semicristalino, com cristalinidade na ordem de 90% e devido a esta alta quantidade de cristais presentes em sua estrutura, tem alta densidade e alta resistência à tração, porém apresenta menor resistência ao SC (LAVOIE, 2007). Dessa forma, a geomembrana estará mais susceptível às fissuras e ao fenômeno de SC, conseqüentemente a vida útil e a propriedade estanque do polímero serão afetadas (HSUAN et al., 1991).

Neste contexto, esta pesquisa aborda a avaliação à susceptibilidade ao fenômeno de SC, à durabilidade e ao nível de degradação das amostras de geomembrana de PEAD exumadas *in situ* a longo prazo.

Material e Métodos

As amostras utilizadas de geomembrana de PEAD exumadas *in situ* utilizadas nesta pesquisa estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Geomembranas de PEAD utilizadas na pesquisa

Amostra	Espessura Nominal (mm)	Aplicação	Tempo de Exposição (anos)
CLIQ	1,0	Lagoa de Água Industrial	2,25
LDO	0,8	Lagoa de Resíduos Orgânicos	15,17
MIN	1,0	Lagoa de Mineração	7,92
MIN2	1,0	Vertedouro de uma Barragem de Rejeito de Ferroníquel	10,08
CAM	0,8	Lagoa de Criação de Camarões - Revestimento da Base	8,25
CAM1	0,8	Lagoa de Criação de Camarões - Revestimento do Talude	8,25
CAM2	0,8	Outra Lagoa de Criação de Camarões	3,0

As amostras CAM e CAM1 se referem a geomembrana exumada de uma lagoa de criação de camarões, após 8,25 anos de serviço. Porém, a amostra CAM foi exumada da base da lagoa, e a amostra CAM1 foi exumada do talude da lagoa. Desta forma, as amostras sofreram com exposições distintas durante o tempo de serviço. A amostra CAM2 refere-se a geomembrana exumada de outra lagoa de criação de camarões após 3,0 anos.

As amostras foram submetidas a ensaios físicos (espessura e densidade), mecânicos (tração e alongamento na ruptura), dispersão de negro de fumo, teor de negro de fumo, índice de fluidez e resistência ao *stress cracking*, totalizando oito avaliações. Os ensaios realizados para caracterizar as amostras estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaios realizados para a caracterização das geomembranas de PEAD

Propriedade	Unidade	Norma
Espessura	mm	ASTM D5199 (2019)
Densidade	g.cm^{-3}	ASTM D792 (2013)
Dispersão de Negro de Fumo	Categoria	ASTM D5596 (2016)
Teor de Negro de Fumo	%	ASTM D4218 (2008)
Resistência à Tração na Ruptura	kN.m^{-1}	ASTM D6693 (2015)
Alongamento à Tração na Ruptura	%	ASTM D6693 (2015)
Índice de Fluidez	g.10 min^{-1}	ASTM D1238 (2013)
Resistência ao <i>Stress Cracking</i>	horas	ASTM D5397 (2020)

O ensaio de espessura em geomembranas lisas atende a ASTM D5199 (2019) e consiste em determinar a espessura da geomembrana por meio de uma análise comparativa da leitura do equipamento sem o corpo de prova e com o corpo de prova submetido a carga de 200 kPa. Deste modo, a leitura da espessura final é feita por meio do relógio comparador.

O ensaio de densidade foi realizado de acordo com a ASTM D792 (2013) que utiliza o princípio de Arquimedes (empuxo) para determinar a densidade do geossintético. O ensaio consiste em determinar a massa seca da amostra e em seguida, a massa da amostra imersa em um fluido. O fluido utilizado como referência foi o álcool isopropílico com densidade de $0,8415 \text{ g.cm}^{-3}$.

O aditivo negro de fumo é acrescentado a geomembrana a fim de aumentar sua resistência à radiação ultravioleta. O ensaio de dispersão de negro de fumo é realizado pelo método prescrito pela ASTM D5596 (2016) e permite uma avaliação do grau de dispersão dos

pigmentos, presença de substâncias externas e degradação da resina por meio do microscópio. É necessário realizar uma análise comparativa entre os resultados e o quadro de referência dos tamanhos permitidos de negro de fumo disponibilizado pela norma. O negro de fumo deve estar uniformemente distribuído em toda extensão da geomembrana para certificar o bom desempenho da manta.

O ensaio de teor de negro de fumo consiste em avaliar a quantidade de negro de fumo em geomembranas. De acordo com a ASTM D4218 (2008), a amostra é submetida a 600 °C no forno e é exposta a atmosfera de nitrogênio durante 15 minutos.

O comportamento em tração de geomembranas é determinado de acordo com a ASTM D6693 (2015) que descreve o ensaio de resistência à tração na ruptura e alongamento nas geomembranas de PEAD. A resistência à tração na ruptura define o esforço que a geomembrana deve suportar durante a vida útil. Os ensaios foram realizados apenas na direção longitudinal da geomembrana, onde o corpo de prova foi submetido ao aumento de carga com velocidade de 50 mm.min⁻¹, obtendo como resultado as tensões e deformações na ruptura.

O ensaio de índice de fluidez é realizado pelo método descrito pela ASTM D1238 (2013). É utilizado para verificar a condição de fluxo do polímero no seu estado fundido. Para geomembranas de PEAD a norma prescreve uma massa de 5 kg que passa através do orifício e a temperatura de 190 °C em 10 minutos com uma carga constante aplicada na amostra. O valor de índice de fluidez é comumente utilizado para uma avaliação indireta do peso dos polímeros termoplásticos. Valores altos de índice de fluidez indicam que o polímero ensaiado apresenta baixo peso molecular. Este ensaio pode ser utilizado também para a avaliação de degradação do material.

O método SP-NCTL (Single Point Notched Constant Tensile Load Test) é utilizado no controle de qualidade de geomembranas de PEAD e atende a ASTM D5397 (2020). De acordo com a norma, o ensaio consiste em aplicar um estágio de carga correspondente a 30% da resistência à tração no escoamento em cinco corpos de prova. Os corpos de prova recebem uma ranhura na região central correspondente a 20% de suas espessuras, e então são imersos em fluido agressivo sob temperatura constante de 50 °C. O fluido é composto por 10%, em volume, de Igepal CO 630 e 90% de água. O equipamento utilizado neste ensaio está representado na Figura 3.



Figura 3 - Ensaio em andamento no equipamento utilizado para realização do SP – NCTL
Fonte: Própria (2020)

Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios físicos de espessura, densidade, dispersão de negro de fumo, teor de negro de fumo e índice de fluidez.

Tabela 3 - Ensaios físicos realizados nas amostras de geomembrana de PEAD

Amostra	Espessura (mm)	Densidade (g.cm ⁻³)	Teor de Negro de Fumo (%)	Dispersão de Negro de Fumo (Categoria)	Índice de Fluidez (g.10min ⁻¹)
CLIQ	0,998 (±0,095)	0,943 (±0,002)	1,24 (±0,17)	Categoria I	0,4256 (±0,0079)
LDO	0,843 (±0,028)	0,965 (±0,0007)	2,60 (±0,66)	Categoria I	0,7375 (±0,0225)
MIN	0,896 (±0,003)	0,947 (±0,0007)	2,02 (±0,47)	Categoria I	0,4016 (±0,0052)
MIN2	0,942 (±0,024)	0,949 (±0,001)	2,81 (±0,04)	Categoria I	0,8635 (±0,0229)
CAM	0,800 (±0,014)	0,937 (±0,002)	3,03 (±0,27)	Categoria I	1,4191 (±0,325)
CAM1	0,769 (±0,011)	0,941 (±0,004)	3,14 (±0,45)	Categoria I	3,9939 (±0,2188)
CAM2	0,772 (±0,038)	0,952 (±0,002)	2,75 (±0,52)	Categoria I	0,5831 (±0,138)

O desvio padrão dos resultados de cada ensaio está entre parênteses

Os ensaios realizados foram comparados com a norma GRI-GM13 que estabelece valores mínimos, máximos ou intervalo de propriedades mecânicas e de resistência que devem ser atendidas no controle de qualidade de geomembranas de PEAD.

Os resultados dos ensaios físicos apresentados na Tabela 3 mostram que todas as amostras apresentaram variação de espessura com relação a espessura nominal, com exceção para a amostra LDO e CAM. A amostra LDO apresentou aumento da espessura em 5,37%, já as amostras MIN, MIN2, CAM1 e CAM2 apresentaram redução de espessura, respectivamente em 10%, 6%, 4% e 3,5%. De acordo com Islam & Rowe (2007), a espessura da geomembrana interfere nas propriedades mecânicas e na durabilidade do produto.

A densidade mínima aceitável pela norma é de 0,940 g.cm⁻³. Observa-se que todas as amostras atenderam a norma com exceção da CAM, que obteve densidade de 0,937 g.cm⁻³ e as amostras LDO e CAM2 apresentaram valores altos para geomembranas modernas, maiores que 0,950 g.cm⁻³. Geomembranas com alta densidade são mais susceptíveis ao fenômeno de SC devido à alta cristalinidade.

Todas as sete amostras foram classificadas na categoria I de dispersão de negro de fumo, em que o diâmetro das partículas deve ser menor que 35 µm. De acordo com Sofri (2005), a dispersão de negro de fumo é necessária para proteção contra os raios UV. As partículas de negro de fumo com diâmetros menores terão maior área superficial em contato com os raios solares, com isso, terão melhor absorção da radiação. O intervalo admissível do teor de negro de fumo é de 2 a 3%. As amostras CAM e CAM1 apresentaram valores maiores que 3%. A amostra CLIQ foi a única amostra que resultou menor que 2%. Um baixo teor de negro de fumo pode reduzir a resistência da geomembrana contra radiação ultravioleta, *stress cracking* e propriedades de tração, também pode ser prejudicial à proteção da resina contra exposição a intempéries.

Os valores obtidos de índice de fluidez das amostras LDO, MIN2 e CAM1 encontram-se na faixa usual de 0,2 a 1,0 g.10 min⁻¹ com valores próximos de 1,0 g.10 min⁻¹. As amostras CAM e CAM1, que pertencem a mesma geomembrana, apresentaram valores superiores a 1,0 g.10 min⁻¹. Além disto, não foi possível realizar o ensaio na amostra CAM1 com a temperatura

padrão de 190 °C, pois o material derreteu. Então, o ensaio foi realizado com a temperatura de 160 °C e apresentou alto valor de índice de fluidez (3,9939 g.10 min⁻¹). Os resultados para estas duas amostras mostram comportamento distinto da geomembrana na base e no talude. A amostras CAM1 apresenta mudança em seu comportamento devido ao alto valor obtido no ensaio de índice de fluidez, mostrando processo de degradação do polímero. Geomembranas com baixo índice de fluidez apresentam boa resistência ao *stress cracking* (SC) (TELLES et al., 1984; MUÑOZ GÓMEZ, 2016).

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à tração na ruptura e alongamento na ruptura.

Tabela 4 - Ensaios mecânicos realizados nas amostras de geomembrana de PEAD

Amostra	Resistência à tração na ruptura (kN.m ⁻¹)	Resistência ao alongamento na ruptura (%)
CLIQ	21,98 (±6,82)	482,63 (±329,65)
LDO	20,35 (±0,98)	259,24 (±342,71)
MIN	22,11 (±4,05)	301,15 (±397,19)
MIN2	24,14 (±4,30)	495,52 (±445,38)
CAM	19,23 (±3,11)	684,63 (±96,46)
CAM1	16,12 (±2,09)	627,07 (±63,27)
CAM2	16,37 (±2,15)	312,74 (±335,42)

O desvio padrão dos resultados de cada ensaio está entre parênteses

O valor mínimo de resistência ao alongamento previsto na GRI-GM13 é 700%. A análise dos parâmetros de resistência ao alongamento na ruptura permite concluir que as amostras CLIQ, MIN, MIN2, LDO e CAM2 apresentaram valores abaixo do mínimo aceitável, mostrando um comportamento frágil. A amostra LDO teve o pior desempenho com 259,4%. As amostras CAM2, MIN e LDO apresentaram valores de alongamento à tração menores que 350%, ou seja, menor que 50% do mínimo exigido para alongamento à tração pela GRI-GM13. As Figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as curvas de tensão-deformação no ensaio de tração das amostras LDO e CLIQ. Observa-se que a amostra LDO apresenta baixos valores de resistência à tração na ruptura para baixos valores de alongamento. A amostra CLIQ apresenta alguns corpos de prova com comportamento frágil.

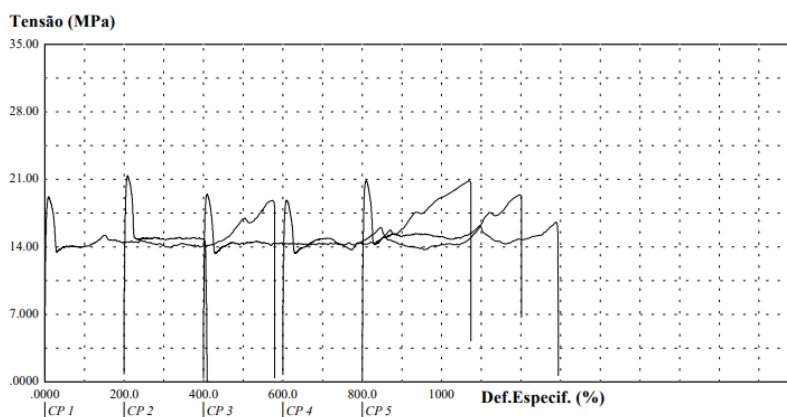


Figura 4 - Curvas de tensão-deformação da amostra LDO

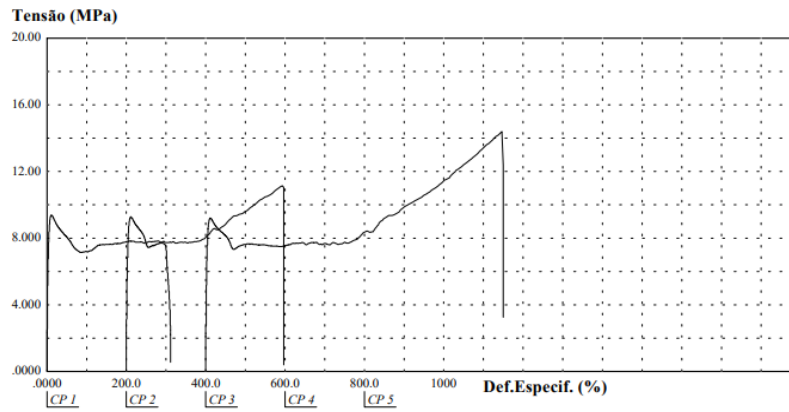


Figura 5 - Curvas de tensão-deformação da amostra CLIQ

As Figuras 6 e 7 apresentam, respectivamente, o gráfico de resistência à tração na ruptura *versus* os tempos de exposição das amostras e o gráfico de alongamento à tração na ruptura *versus* os tempos de exposição das amostras. As referências utilizadas foram os valores mínimos exigidos pela norma GRI-GM13. No caso da resistência à tração na ruptura, foi considerado o valor de 100% para o valor mínimo exigido para cada espessura, de forma a concentrar todas as amostras em um mesmo gráfico.

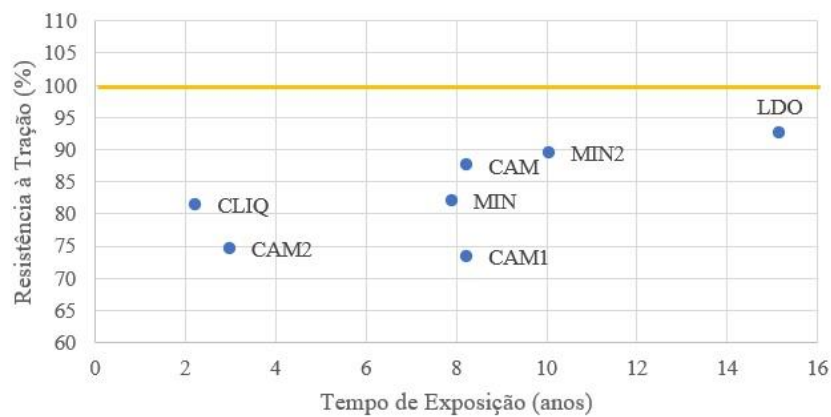


Figura 6 – Gráfico de resistência à tração na ruptura *versus* os tempos de exposição das amostras

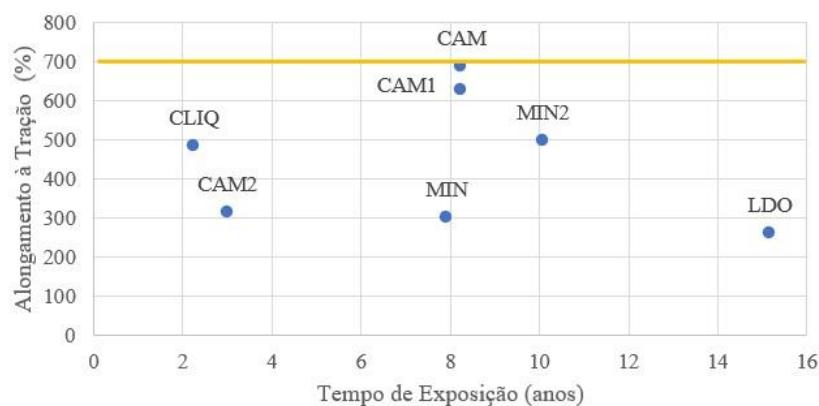


Figura 7 - Gráfico de alongamento à tração na ruptura *versus* os tempos de exposição das amostras

Nenhuma das amostras avaliadas atingiu o valor mínimo aceitável pela norma, tanto em relação a resistência, quanto em relação ao alongamento. Percebe-se que a amostra CAM1 apresentou um pior comportamento mecânico que a amostra CAM.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência ao *stress cracking* (SP-NCTL).

Tabela 5 - Ensaio de *stress cracking* (SC) realizado nas amostras de geomembrana de PEAD

Amostra	SCR (SP-NCTL) (horas)
CLIQ	709,45 ($\pm 78,63$)
LDO	8,89 ($\pm 4,12$)
MIN	45,25 ($\pm 32,13$)
MIN2	20,22 ($\pm 7,04$)
CAM	1151,98 ($\pm 44,64$)
CAM1	4,25 ($\pm 1,52$)
CAM2	90,41 ($\pm 17,01$)

O desvio padrão dos resultados de cada ensaio está entre parênteses

A GRI-GM13 estipula 500 horas como o tempo mínimo aceitável para o ensaio. A amostra CLIQ apresentou bom comportamento ao SC, apesar dos baixos valores mecânicos obtidos no ensaio de tração, atendendo o valor mínimo exigido pela norma. A amostra CAM apresentou o melhor comportamento com 1151,98 horas. As amostras MIN, MIN2 e CAM2 apresentaram baixos valores de resistência. As amostras LDO e CAM1 apresentaram os piores resultados dentre as amostras avaliadas, corroborando com o comportamento frágil descrito pelos resultados no alongamento à tração.

A Figura 8 apresenta o gráfico de resistência ao SC *versus* os tempos de exposição das amostras.

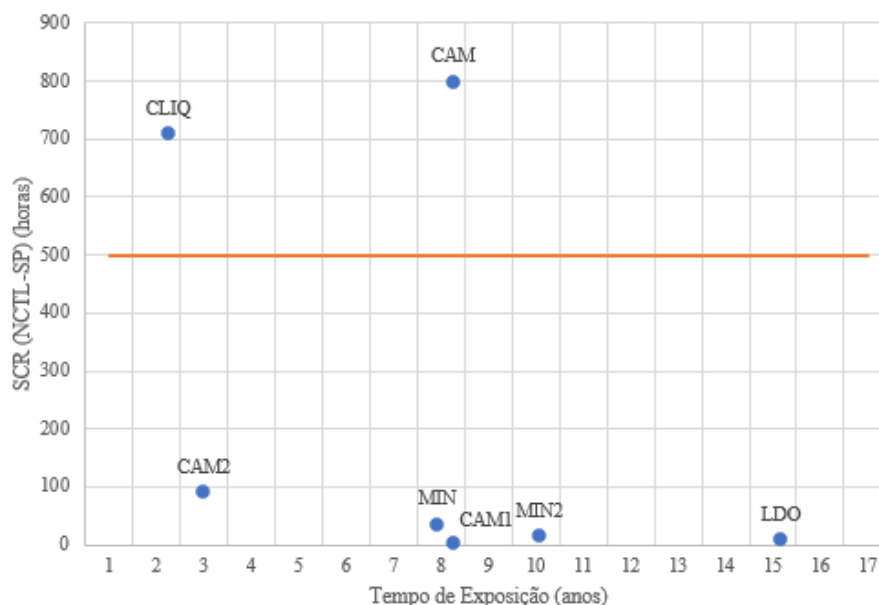


Figura 8 - Gráfico de resistência ao *stress cracking* (SCR-NCTL-SP) *versus* os tempos de exposição das amostras

Conclusões

O presente trabalho apresentou uma investigação de laboratório a partir de amostras exumadas de geomembranas de PEAD em diferentes aplicações com diferentes tempos de exposição em campo para caracterizar e avaliar o nível de degradação das amostras, visando entender melhor o comportamento dos materiais a longo prazo. Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas variaram conforme o tempo de exposição indicando comportamento frágil e possível processo de degradação para as amostras CAM2, MIN e LDO.

O expressivo valor de índice de fluidez da amostra exumada do revestimento do talude de uma lagoa de criação de camarões após mais de 8 anos em serviço (CAM1) indica ocorrência de degradação oxidativa na geomembrana, provavelmente devido ao efeito de quebra das cadeias poliméricas. Observou-se que a amostra CAM, que representa a mesma geomembrana na base da lagoa de criação de camarões mostrou valor de índice de fluidez menor e melhor comportamento mecânico, quando comparada a amostra CAM1.

As amostras CAM, MIN, MIN2 e LDO apresentaram baixos valores de resistência ao *stress cracking* (SC). As amostras LDO e CAM1 mostraram os piores comportamentos ao SC entre todas as amostras avaliadas neste trabalho, corroborando com os comportamentos apresentados no ensaio de tração. Percebe-se que ambas as amostras provavelmente estão em processo de degradação com mudança de suas propriedades.

Por fim, é possível afirmar que as análises realizadas forneceram informações importantes para o conhecimento das propriedades e comportamento das geomembranas de PEAD em diferentes aplicações para diferentes tempos de exposição. Porém não é possível realizar previsões de outras situações de campo com os resultados obtidos nessa pesquisa, pois cada aplicação necessita de um estudo específico sobre os possíveis efeitos sinérgicos e solicitações que poderão afetar o desempenho da geomembrana em obra.

Referências Bibliográficas

- American society for testing and materials. ASTM D792: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, 2013.
- American society for testing and materials. ASTM D883: Standard Terminology Relating to Plastics, 2020.
- American society for testing and materials. ASTM D1238: Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer, 2013.
- American society for testing and materials. ASTM D4218: Standard Test Method for Determination of Carbon Black Content in Polyethylene Compounds by the Muffle-Furnace Technique, 2008.
- American society for testing and materials. ASTM D5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetic, 2019.
- 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, 2020.
- American society for testing and materials. ASTM D5596: Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics, 2016.
- American society for testing and materials. ASTM D6693: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes, 2015.
- Bueno, B.S. (2003) Propriedades, Especificações e Ensaio. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos.
- Hsuan, Y.G.; Lord Jr. A.E.; Koerner, R.M. (1991) Effects of Outdoor Exposure on High Density Polyethylene Geomembrane. *Geosynthetics*, Atlanta. 287–302.

- Islam, M. Z.; Rowe, R. K. (2007) Effect of HDPE geomembrane thickness on the depletion of antioxidants. 60th Canadian Geotechnical Conference and the 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference. Ottawa, Canada, 2129-2134.
- Kay, D.; Blond, E.; Mlynarek, J. (2004) Geosynthetics Durability: A Polymer Chemistry Issue. 57th Canadian Geotechnical Conference. Quebec, Canada, 1-14.
- Koerner, R.M. (2005). Designing with Geosynthetics. *Englewood Cliffs: Prentice Hall Publ. Co.* New Jersey.
- Koerner, R. M.; Lord, A. E.; Hsuan, Y. H. (1992) Arrhenius Modeling to Predict Geosynthetic Degradation. *Geotextiles and Geomembranes*, **11**, 151-183.
- Lavoie, F.L. (2007) Ensaio de Fissuramento sob Tensão (Stress Cracking) em Geomembrana de PEAD Submetida à Radiação Ultravioleta e ao Envelhecimento Térmico, 2-5.
- Lavoie, F.L. (2016) Geocomposto Bentonítico em Bases de Aterros de Resíduos: Uma Visão Otimizada dos Recursos Naturais. *Revista Fundações & Obras Geotécnicas*, Ano 6, **66**, 32-33.
- Marques, A.C.M. (2003) Avaliação dos Efeitos da Compactação na Geração de Líquidos Percolados em Aterros Sanitários. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental.
- Muñoz Gómez, M. (2016) 3rd Pan American Conference on Geosynthetics. Miami, USA.
- Rowe, R. K.; Sangam, H. P. (2002) Durability of HDPE Geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, **20**, 77-95.
- Sofri, Fabio Lamon (2005) Influência do Negro de Fumo na Absorção da Radiação na Região do Infravermelho para o Reaquecimento do Copolímero de Poli (Tereftalato de Etileno) PET. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 67-77.
- Telles, R.W., Lubowitz, H.R., Unger, S.L. (1984) Assessment of Environmental Stress Corrosion of Polyethylene Liners in Landfills and Impoundments. 1st U.S. EPA: Cincinnati. Test methods, test properties and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes SM. GRI—GM13 Standard Specification. Geosynthetic Institute, 2019.
- Vilar, O.M. (2003). Geossintéticos em Aplicações Ambientais. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos. Porto Alegre, 18.
- Wright, D.C. (1996) Environmental *Stress Cracking* of Plastics. *Shawbury: Rapra Technology Limited*.