

DEGRADAÇÃO DE GEOMEMBRANAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (HDPE) APÓS EXPOSIÇÃO À INTEMPÉRIE E LIXÍVIA

Paulo C. Lodi^{1*}, Jorge G. Zornberg², Benedito de S. Bueno³

1) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Alameda Bahia, 550, CEP: 15.385-000, Ilha Solteira (SP), Brasil. Correo electrónico: plodi@dec.feis.unesp.br

2) Civil Engineering Department-GEO, University of Texas at Austin, 1 University Station C1792 Austin, TX 78712-0280, Texas, USA. Correo electrónico: zornberg@mail.utexas.edu

3) Departamento de Geotecnica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Avenida do Trabalhador São Carlense, 400, CEP: 13.566-590, São Carlos, Brasil. Correo electrónico: bsbueno@.sc.usp.br

Recibido: Julio 2009; aceptado: Enero 2010

RESUMEN

Este artigo apresenta alguns resultados obtidos em ensaios de MFI e de OIT realizados em geomembranas de HDPE de 0,8 e 2,5 mm que foram expostas aos efeitos da intempéria e de lixívia de esgoto doméstico após 30 meses (2,5 anos). O objetivo do trabalho é avaliar o processo de degradação oxidativa por meio da comparação dos resultados das amostras intactas e expostas. As exposições e ensaios foram realizados de acordo com as recomendações das seguintes normas: ASTM D1435 (intempéria), ASTM D5747 e D5322 (lixívia), ASTM D1238 (MFI) e D3895 (OIT). Os resultados mostram, por exemplo, que os valores de MFI apresentaram elevados aumentos nas geomembranas de 2,5 mm indicando que houve quebra nas cadeias poliméricas dessas em ambas as exposições e, portanto, degradação oxidativa. Com relação aos valores de OIT, nota-se que todas as geomembranas apresentaram valores extremamente baixos mesmo nas amostras intactas. Isso demonstra que não havia um pacote de antioxidantes adequado para estas membranas.

Palabras Claves: Geomembranas, HDPE, Intempéria, Lixívia, MFI, OIT.

ABSTRACT

This paper presents some results of MFI and OIT tests performed on HDPE geomembranes of 0,8 and 2,5 mm that were exposed to weathering effects and leachate after 30 months (2,5 years). The aim of this work is the evaluation of the oxidative degradation process by comparison of fresh and exposed samples results. The exposing and tests were performed according the following standards recommendations: ASTM D1435 (weathering), ASTM D5747 e D5322 (leachate), ASTM D1238 (MFI) e D3895 (OIT). The results shows, for instance, that the MFI values presented high increases on the HDPE (2.5 mm) showing that polymeric chain break occurred for both exposures and, therefore, oxidative degradation. Concerning the OIT values all the geomembranes presented very low values even in the fresh samples. This demonstrates that there wasn't an antioxidant package appropriate for these membranes.

Keywords: Geomembranes, HDPE, Weathering, Leachate, MFI, OIT.

1. INTRODUÇÃO

As geomembranas são materiais poliméricos que podem ser aplicados em diversas áreas, a saber: área de transporte (túneis), engenharia ambiental (aterros sanitários, lagoas, reservatórios) e na engenharia geotécnica (barragens, canais, bases de ferrovias). Apesar das vantagens oferecidas pelas geomembranas em relação a materiais de uso consagrado, estas podem degradar quando

expostas à radiação ultravioleta - UV (intempéries) ou quando em contato com materiais agressivos, lixívia e resíduos industriais. As geomembranas desempenham o papel mais significativo de todos os materiais geossintéticos em sistemas de liners de aterros, pois funcionam como barreiras para os líquidos gerados pela contenção das lixívia [1]. Os ambientes onde os geossintéticos são aplicados são agressivos devido aos efeitos de temperatura, UV, oxidação e agentes químicos que degradam as barreiras [2].

Tabela 1. Efeitos sobre geomembranas expostas à intempéries e resíduos [3].

<i>Tipo de Exposição</i>	<i>Efeitos nas membranas</i>
<i>Intempéries</i> Oxidação	
Temperatura elevada	Enrijecimento e perda de resistência à tração, ao rasgo e perda de alongamento Redução da resistência mecânica e degradação, geralmente enrijecimento, mas algumas vezes amolecimento
Ozônio	Fissuras em pontos de deformação
Luz UV	Enrijecimento e fissuras
Perda de plastificante volátil	Enrijecimento e pode tornar-se quebradiço (frágil)
Umidade elevada	Absorção de água, lixiviação de antioxidante resultando em grande susceptibilidade à oxidação e UV
<i>Resíduos</i>	
Inchamento	Amolecimento acompanhado por perda de propriedades incluindo aumento na permeabilidade Vazamentos (buracos) ou perda geral da função de barreira
Dissolução	Pode enrijecer e perder elongação
Extração de plastificante	Torna-se mais suscetível à degradação
Extração de anti-degradante	Fluência do liner, fissuramento e ruptura
Tensões	
<i>Combinação de exposição à intempéries e resíduos:</i>	A combinação de exposição à intempéries e resíduos freqüentemente é mais severa do uma exposição isolada destas.
<i>Biodegradação na presença de oxigênio:</i>	Plastificantes, óleos e moléculas monômericas orgânicas podem sofrer biodegradação

Haxo y Nelson [3] estudaram os fatores na durabilidade de membranas poliméricas utilizadas em barreiras e classificaram os diferentes modos de ruptura de uma membrana, a saber: a) amolecimento e perda de propriedades físicas devido à despolimerização e cisão molecular, b) enrijecimento e fragilização devido à perda de plastificantes e aditivos, c) redução das propriedades mecânicas e aumento da permeabilidade e d) ruptura das emendas da membrana. Os efeitos da

exposição à intempéries e resíduos estão sumarizados na Tabela 1 e os fatores que afetam a durabilidade na Tabela 2.

Tabela 2. Fatores que afetam a durabilidade de geomembranas [3].

<i>Tipo</i>	<i>Elementos</i>
<i>Fatores de compatibilidade com resíduos líquidos</i>	Químicos Físicos
<i>Fatores de Intempéries – localização geográfica</i>	Radiação solar Temperatura (elevada, baixa, ciclos e oscilações) Água (sólida, líquida e vapor) Constituintes do ar: oxigênio e ozônio
<i>Fatores de tensão</i>	Tensões prolongadas e periódicas Tensões, ocasionais: Ação física da chuva, granizo e neve Ação física do vento Movimento devido a outros fatores: recalques Descontinuidades nas penetrações
<i>Fatores operacionais e de uso</i>	Projeto do sistema, princípios básicos e instalação Prática operacional

Haxo y Haxo [4] descrevem os diferentes parâmetros que influenciam a durabilidade e envelhecimento de produtos geossintéticos em aterros sanitários. Esses parâmetros podem ser agrupados em três grupos: tensões químicas, mecânicas e biológicas. Provavelmente agem simultaneamente e causam diferentes tipos de agressividade ao material. As ações químicas, que são afetadas pela temperatura, são induzidas pela exposição ao resíduo líquido, UV, raios infravermelhos, água da chuva, oxigênio e ozônio. Diferentes efeitos ocorrerão variando desde cisão na estrutura, ligações cruzadas e amolecimento, inchaço e dissolução do polímero, volatização ou extração de plastificantes e aumento da cristalinidade. As tensões mecânicas são induzidas por penetração, aumento de sobrecarga, carga hidráulica, chuva, granizo, neve e vento, tensões em superfícies inclinadas e recalques. Seus efeitos na membrana são: rasgo, fissuramento, ruptura e fluência. As tensões biológicas resultam da biodegradação de microorganismos a ataque de roedores, pássaros e insetos que podem afetar certos materiais.

Pohl y Weston [5] retratam a necessidade de uma análise da durabilidade em longo prazo nas aplicações selecionadas. Para esses autores, os seguintes mecanismos de degradação devem ser avaliados: raios UV, radiação, substâncias químicas, expansão (inchamento), volatização,

deslaminação e oxidação. Reforçam também a análise dos efeitos de variação de temperatura no Brasil que podem aumentar muito durante o dia e/ou variar muito entre o dia e a noite. Com a temperatura muito elevada, a contração da geomembrana pode ser irreversível devido à perda de componentes voláteis. *Vidal et al.* [6] ressaltam que a perda de componentes, além de facilitar a degradação e alterar as propriedades de engenharia do produto, pode causar contração e, consequentemente, esforços de tração suplementares na manta.

Dessa forma, este trabalho procura avaliar o processo de degradação em geomembranas de HDPE (0,8 e 2,5 mm) que foram expostas à intempéries e lixívia por um período de tempo de 2,5 anos. Foram realizadas análises térmicas (ensaio de fluidez – MFI e de tempo de oxidação – OIT) nessas amostras para a avaliação da degradação oxidativa do material.

2. PARTE EXPERIMENTAL

As geomembranas de HDPE foram avaliadas após 30 meses de exposição à intempéries e à lixívia de esgoto doméstico. Foram avaliadas duas espessuras de geomembranas em ambas as exposições: 0,8 e 2,5 mm.

Os procedimentos de exposição à intempéries foram realizados de acordo com as orientações da ASTM D1435 [7]. Para tanto, construiu-se um painel com área de aproximadamente 25 m² no campo de fundações da *Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira* (UNESP). O painel está disposto no eixo Leste-Oeste com inclinação de 45°. As amostras foram colocadas sobre uma tela no referido painel (Figura 1) e possuíam tamanhos de (21 x 30) cm para facilidade de manuseio.



Figura 1. Amostras expostas à intempéries.

Durante o período de exposição dos materiais foi feito o acompanhamento das principais

propriedades climáticas da região através da estação meteorológica instalada no *Departamento de Irrigação da Agronomia na UNESP*. O local situa-se exatamente nas seguintes coordenadas geográficas: 20° 22' S e longitude: 51° 22' W. A altitude média é de 335 metros e a Albedo de 0,25 (Superfície vegetada).

Com relação à exposição à lixívia, foram seguidas as recomendações especificadas nas normas ASTM D5747 [8] e D5322 [9].

O local utilizado para esta etapa de envelhecimento localiza-se na central de esgoto da cidade de *Ilha Solteira*. O esgoto foi constantemente circulado, não havendo o perigo de incrustação ou deposição do mesmo sobre as amostras. As amostras foram dispostas dentro de caixas d'água com capacidade de 1000 litros onde ocorria a circulação do esgoto conforme ilustra a Figura 2.

O ensaio de Índice de Fluidez (MFI) ou simplesmente MI ou IF é usado para controlar a uniformidade do polímero através da extrusão do mesmo sob pressão e temperatura específicas. O ensaio determina a fluidez das membranas sob carga constante para empurrá-las através de um orifício normalizado. Normalmente utiliza-se a norma ASTM D1238 [10] para a obtenção dos valores de MFI. Esta norma inclui a definição do tipo de aparelho a ser empregado, as dimensões do orifício para a extrusão do polímero, condições de ensaio em termos da massa que irá ocasionar a extrusão e, a temperatura de ensaio correspondente a cada polímero. Esse tipo de ensaio é utilizado apenas para o HDPE e não se recomenda sua determinação para o PVC devido à quantidade de voláteis e plastificantes presentes em sua composição.

O ensaio foi realizado no Departamento de Materiais (DEMA) da *UFSCar*. Para tanto, foi utilizado o procedimento E da norma ASTM D1238 que especifica uma temperatura de 190° C e uma massa de 2,16 kg para o ensaio. A Figura seguinte ilustra o equipamento utilizado na realização do ensaio de MFI.



(a)

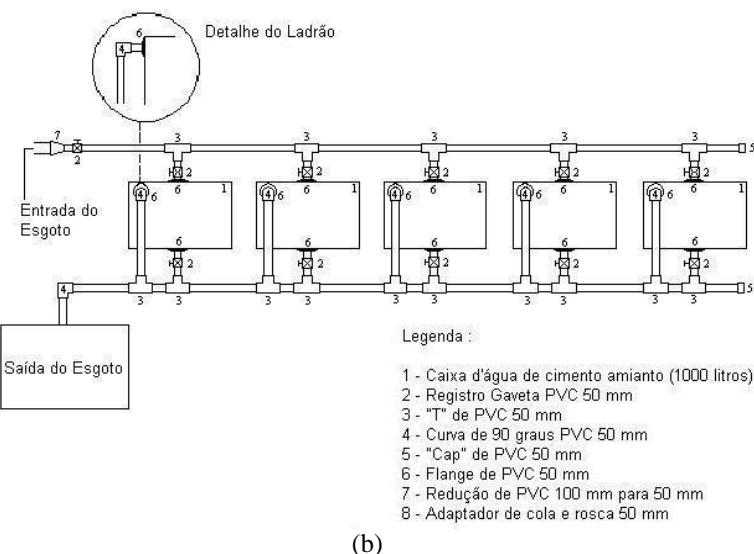


Figura 2. (a): Amostras expostas nas caixas d'água, (b): detalhe do processo de circulação da lixívia.

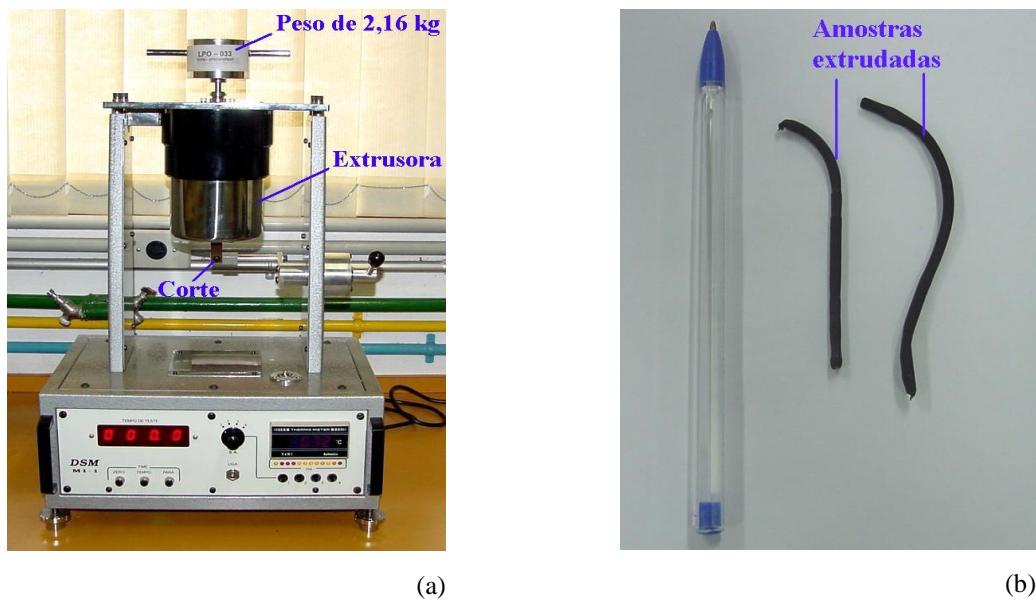


Figura 3. (a) Equipamento para determinação do MFI (b) detalhe das amostras extrudadas.

As amostras de HDPE foram colocadas num recipiente na parte superior do equipamento. Em seguida, aplicando-se a massa de 2,16 kg a 190°C, as amostras começavam o processo de extrusão sendo expulsas do cilindro na parte inferior. Após 10 minutos de ensaio as amostras foram cortadas determinando-se suas respectivas massas. O valor do índice MFI foi determinado pelo valor médio de três amostras.

O Ensaio de OIT (tempo de oxidação) foi realizado no DEMA (*Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar*) de acordo com os procedimentos da norma ASTM D3895 [11]. O equipamento específico utilizado para a realização dos ensaios está ilustrado na Figura 4.

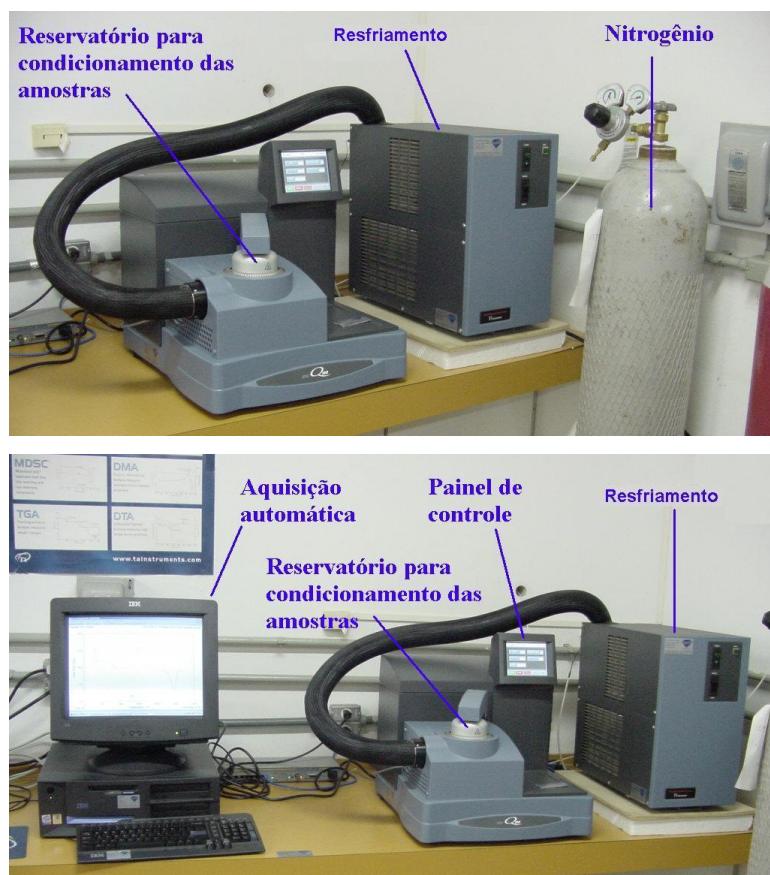


Figura 4. Equipamento para realização de ensaio DSC com OIT.

As amostras foram equilibradas na temperatura de 30°C no equipamento. Em seguida, realizou-se uma rampa de aquecimento a uma taxa de 10°C/min até a temperatura de 200°C. Nessa fase do ensaio foi utilizado o nitrogênio (N₂) super seco FID 4.6. Ao se atingir 200°C, foi realizada uma isoterma à mesma temperatura por 5 minutos. Em seguida, o equipamento efetuou a mudança automática de gás passando a injetar oxigênio a uma taxa de 50 mL/min na amostra por um período de 100 minutos a 200°C. O valor do Tempo de Oxidação das amostras (OIT) é obtido graficamente verificando-se o tempo decorrido desde o início da aplicação do oxigênio até a oxidação completa do material. Essa fase final é retratada graficamente pelo aparecimento de um pico de oxidação (Figura 5).

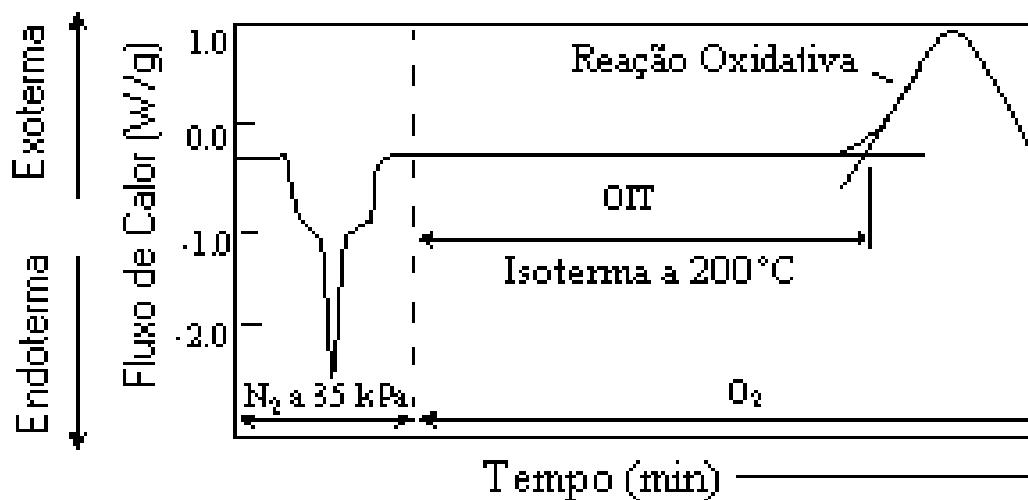


Figura 5. Curva térmica para obtenção do valor do OIT [13].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 3 e 4 seguintes apresentam, respectivamente, os valores de MFI e de OIT obtidos para as amostras de HDPE intactas e envelhecidas de acordo com o processo de envelhecimento após 30 meses (2,5 anos). As Figuras 7 e 8 ilustram os resultados obtidos para os ensaios de OIT.

Tabela 3. Valores de MFI para as amostras de HDPE.

Processo de Envelhecimento	Amostra de HDPE (mm)	MFI (g/10 min)	Variação Percentual (%) [*]	Provável ocorrência ^{**}
Intactas	0,8	0,1778	-	-
	2,5	0,1460	-	-
Intempérie	0,8	0,1500	↓ 15,64	LC
	2,5	0,2302	↑ 57,67	QC
Lixívia	0,8	0,2046	↑ 15,07	QC
	2,5	0,2558	↑ 75,20	QC

* Variação percentual dos valores de MFI obtidos para as amostras envelhecidas em relação aos valores de MFI das amostras intactas: ↓ (diminuição) ↑ (aumento); ** LC = Ligação cruzada; QC = Quebra (cisão) nas cadeias.

Tabela 4. Valores de OIT para as amostras de HDPE.

<i>Processo de Envelhecimento</i>	<i>Amostra de HDPE</i>	<i>OIT *</i>
	<i>mm</i>	<i>minutos</i>
Intactas	0,8	12,55
	2,5	10,05
Intempérie	0,8	8,11
	2,5	11,28
Lixívia	0,8	3,61
	2,5	6,89

* De acordo com o método GM13, o valor mínimo aceitável de OIT = 100 minutos;

** Porcentagem em relação aos valores de OIT das amostras intactas. De acordo com o método GM13, este valor dever ser no mínimo de 55%.

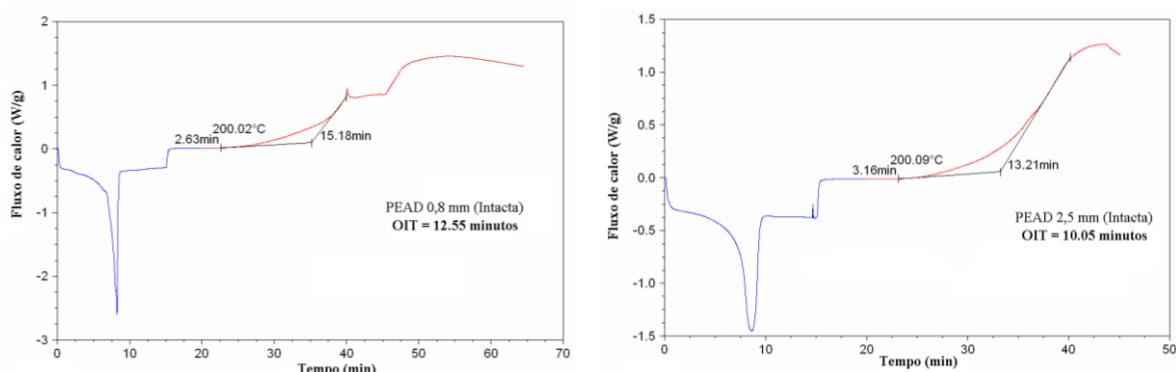


Figura 6. Valores de OIT para as amostras intactas de HDPE.

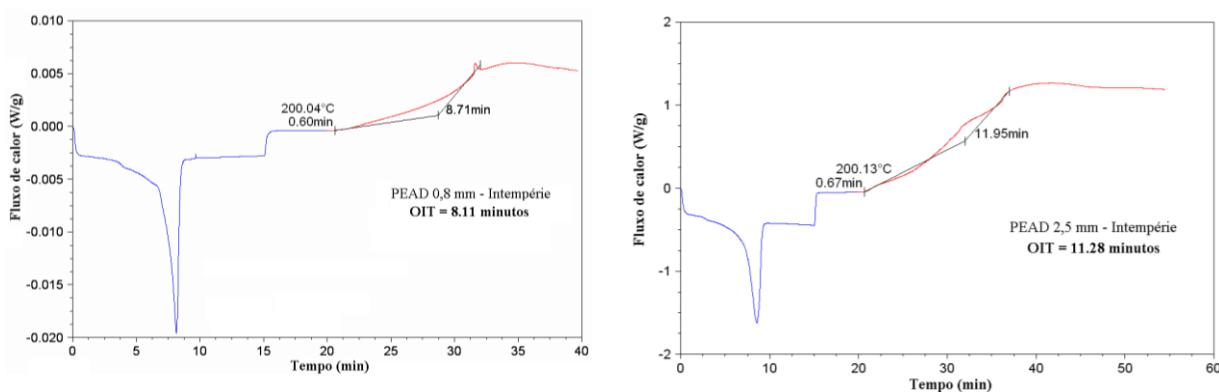


Figura 7. Valores de OIT para as amostras de HDPE envelhecidas na intempérie.

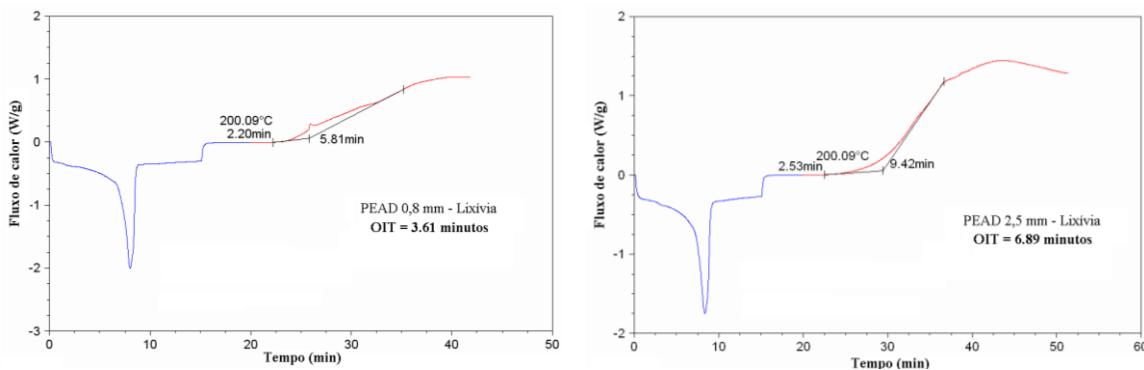


Figura 8. Valores de OIT para as amostras de HDPE envelhecidas na lixívia.

Analizando-se os valores obtidos do índice de fluidez (MFI), observa-se que os valores obtidos para as amostras intactas encontram-se abaixo da faixa usual que, de acordo com *Sharma y Lewis* [12] é de 0,2 a 1,0 g/10 min. Esses baixos valores do MFI resultam em um alto valor de peso molecular. Isso se evidencia pelo valor da densidade obtida para as geomembranas, ou seja, quanto maior o valor da densidade, maior será o valor do peso molecular e, consequentemente, isso resultará num baixo valor do MFI.

Normalmente, os valores da densidade das resinas de HDPE encontram-se na faixa de 0,932 a 0,940. Com a adição de negro de fumo (2-3%) e antioxidante (0,5%), a formulação final do produto irá apresentar uma densidade de 0,941 a 0,950 [13]. De acordo com a relação entre a massa específica da resina e do produto proposta por *Giroud* [14], pode-se estimar os valores de negro de fumo utilizados nas geomembranas de HDPE. A relação é expressa por:

$$\rho_{\text{produto}} = \rho_{\text{resina}} + 0,0044C \quad (1)$$

onde C = quantidade de negro de fumo (%). Como $\rho_{\text{produto}} = 0,95 \text{ g/cm}^3$ (valor obtido) então,

$$(1) \text{ se } \rho_{\text{resina}} = 0,932 \text{ g/cm}^3 \text{ (menor valor)} \Rightarrow C \approx 4,10\%$$

$$(2) \text{ se } \rho_{\text{resina}} = 0,940 \text{ g/cm}^3 \text{ (maior valor)} \Rightarrow C \approx 2,27\%$$

Isso fornece um valor médio da quantidade de negro de fumo de aproximadamente 3,19%. Verifica-se, portanto, que o valor estimado da percentagem de negro de fumo pela equação de *Giroud* [14] está dentro dos limites normalmente utilizados na prática (ver por exemplo [12]).

Como os valores obtidos do MFI encontram-se abaixo dos valores encontrados na literatura poder-se-ia supor inicialmente que o produto encontra-se fora de sua especificação. No entanto, de acordo com *Hage* [15] é difícil de se estabelecer uma faixa de valores para o índice de fluidez sem o prévio conhecimento das condições de extrusão do material durante o seu processamento. De acordo com o pesquisador, esses valores do MFI encontram-se dentro de uma faixa normal de extrusão. Ademais, os valores obtidos da densidade do material (0,95) assim como de sua porcentagem de negro de fumo (3,19%) estão em concordância com as especificações do mesmo. Ressalta-se, porém, que se o fabricante estipula um valor do MFI e este não corresponde ao valor do material entregue em obra, pode-se perfeitamente rejeitar o produto em virtude de provável alteração na qualidade da resina que será detectada pela alteração no valor do índice de fluidez.

As variações ocorridas no valor do MFI indicam ocorrência de degradação oxidativa quer seja por ocorrência de ligação cruzada ou por quebra de cadeias (cisão) do polímero. Se o valor do MFI decresce, ocorre aumento do peso molecular (PM) e surgem ligações cruzadas. A ocorrência de ligações cruzadas resulta da quebra dos vínculos das cadeias que passam a se interligarem de forma cruzada e, apesar de resultar em melhoria parcial de algumas propriedades, altera as propriedades mecânicas do material tornando-o mais rígido e diminuindo sua deformabilidade. Se o inverso ocorre, ou seja, aumento no valor do MFI, irá ocorrer decréscimo do PM e cisão nas cadeias poliméricas. A cisão nas cadeias poliméricas torna o polímero mais quebradiço e suscetível ao fenômeno do stress-cracking (fissuramento sob tensão).

Após os respectivos períodos de envelhecimento, verifica-se que somente a geomembrana com espessura de 0,8 mm apresentou decréscimo no valor do MFI (15,64%) após a exposição à intempérie. O comportamento das propriedades de tração (aumento de rigidez e diminuição na deformabilidade) após esse tipo de exposição confirma o aparecimento de ligações cruzadas no material evidenciando a degradação oxidativa [16]. As demais membranas apresentaram acréscimos nos valores do MFI. Nota-se que os valores apresentados pelo HDPE de 2,5 mm em ambas as exposições são extremamente elevados (57,67% - intempérie; 75,20% - lixívia) indicando provável ocorrência de cisão nas cadeias poliméricas e susceptibilidade ao fenômeno do stress-cracking. Dessa forma, verifica-se que através dos valores do índice de fluidez, as geomembranas com espessura de 2,5 mm sofreram processo degradativo mais acentuado após exposição à intempérie e lixívia. A espessura de 0,8 mm também apresentou cisão nas cadeias após exposição à lixívia.

Em termos práticos, se o processo de cisão prossegue, as regiões quebradiças irão aumentando

progressivamente de tal forma que ocorra fissuramento nas regiões solicitadas da geomembrana. *Rowe y Sangam* [17] ressaltam que uma vez que o fissuramento provoque aumento do fluxo através da geomembrana, esta pode ser considerada como uma geomembrana que atingiu o fim de sua vida útil (“*service life*”).

Para a análise dos resultados dos ensaios de OIT foram utilizadas as recomendações da especificação GM13 [18] do *Geosynthetic Research Institute* (GRI) uma vez que a norma ASTM D3895 [11] não faz nenhuma recomendação acerca dos valores mínimos de OIT e das porcentagens aceitáveis após envelhecimento em condições específicas. De acordo com a GM13 [18], os valores mínimos aceitáveis de OIT para as geomembranas lisas e texturizadas, independente da espessura, é de 100 minutos para o ensaio padrão a 200°C (Std-OIT) e de 400 minutos para o ensaio realizado com alta pressão a 150°C (HP-OIT).

Analizando-se os resultados obtidos para as amostras ensaiadas de acordo com o Std-OIT, verifica-se que as amostras de 0,8 e 2,5 mm apresentaram valores de OIT extremamente baixos. Após os respectivos processos de envelhecimento, os valores de OIT obtidos apresentaram diminuição em relação aos valores das amostras intactas. As geomembranas com menor espessura apresentaram os menores valores de OIT após as exposições.

De forma geral, observa-se que os valores de OIT obtidos para as geomembranas de foram relativamente baixos para as amostras intactas e envelhecidas. Comparando-se os valores de OIT com os valores do MFI, nota-se que há uma concordância dos resultados indicando a presença do processo degradativo oxidativo nas geomembranas.

Como exposto anteriormente, o consumo de antioxidantes ocorre por processo de volatilização e de extração. No caso específico da pesquisa, verificou-se que, provavelmente, a perda de antioxidantes ocorreu por processo de volatilização nas amostras expostas ao calor (intempérie). O fenômeno de extração e volatilização ocorreu nas amostras imersas na lixívia. Novamente contrastando-se os valores do MFI e OIT, verifica-se que ocorreram elevados aumentos nos valores do MFI quando da exposição à lixívia e intempérie. Dessa forma, há evidência de que nas amostras imersas o consumo de antioxidantes ocorreu mais rapidamente do que nas amostras expostas ao tempo.

Com relação aos valores obtidos no ensaio de OIT, deve-se levar em conta que o ensaio Std-OIT a 200°C com pressão de 35 kPa, pode conduzir a resultados equivocados principalmente para antioxidantes do tipo HALS (pacote de antioxidantes das geomembranas ensaiadas). O ensaio de OIT

com alta pressão (3500 kPa e 150°C) certamente é mais eficaz para detectar os diferentes tipos de antioxidantes, além do mais, trabalha com temperaturas mais próximas à temperaturas de serviço das geomembranas. No entanto, apesar desses inconvenientes, os valores de OIT indicam que o pacote de antioxidantes utilizado nessas geomembranas não estava adequadamente formulado.

4. CONCLUSÕES

Foram apresentados os resultados de ensaios de MFI e de OIT realizados em geomembranas de HDPE de 0,8 e 2,5 mm que foram expostas aos efeitos da intempéria e de lixívia de esgoto doméstico após 30 meses (2,5 anos). Esses resultados permitiram avaliar o processo de degradação oxidativa que ocorreu nas geomembranas após as exposições.

Os valores do índice de fluidez indicaram que as geomembranas com espessura de 2,5 mm sofreram processo degradativo mais acentuado (quebra das cadeias poliméricas) após exposição à intempéria e lixívia. A espessura de 0,8 mm também apresentou cisão nas cadeias após exposição à lixívia. Os valores de OIT mostram que as geomembranas não estavam adequadamente protegidas pelo pacote de antioxidantes apresentando valores extremamente baixos.

Dessa forma, verificou-se que as análises térmicas realizadas nas geomembranas foram de suma importância para a identificação da degradação oxidativa. Essa observação é importante pelo fato de muitos projetistas adotarem variações apenas das propriedades de tração, ou seja, estas podem ainda estar dentro de certos limites aceitáveis, no entanto, através das análises térmicas, principalmente os ensaios de MFI e OIT, constatou-se que a degradação do material já começou a ocorrer principiando situações mais críticas de desempenho da geomembrana em obra. Ressalta-se também que, pela eficiência demonstrada por esses ensaios na identificação dos processos degradativos, as análises térmicas devem ser utilizadas em qualquer tipo de avaliação da qualidade e durabilidade das geomembranas.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao *Dema* (Departamento de Engenharia de Materiais) da *Universidade Federal de São Carlos* (UFSCar) pela realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] Hsuan YG, Koerner RM “Long Term Durability of HDPE Geomembranes: Part I – Depletion of Antioxidants”, *GRI Report* **16**, 35 (1995)
- [2] Reddy DV, Butul B “A comprehensive literature review of liners failures and longevity”, *submitted to Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management University of Florida*, July 12, 1999, 156 p.

- [3] Haxo H, Nelson N "Factors in the Durability of Polymeric Membrane Liners", *International Conference on Geomembranes Denver*, USA, 1984, pp. 287-292
- [4] Haxo H, Haxo P "Environmental Conditions Encountered by Geosynthetics in Waste Containment Applications", *Durability and Aging of Geosynthetics*, Editado por Koerner RM, 1989, pp. 28-47
- [5] Pohl DH, Weston RF "Geomembranas: Aplicações e considerações sobre a qualidade e confiabilidade e controle de qualidade", *Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia - Brasília (DF); 2º simpósio brasileiro sobre aplicações de geossintéticos*, São Paulo, Junho 1995
- [6] Vidal D, Gourc JP, Pierson P "Sistemas de Impermeabilização com Geossintéticos", *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, vol 3 - Foz do Iguaçu, 1994.
- [7] ASTM D1435-95 *Standard Practice for Outdoor Weathering Plastics*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [8] ASTM D5747-95 *Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [9] ASTM D5322-92 *Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [10] ASTM D1238-00 *Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer Endurance of the Geomembrane under Examination*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [11] ASTM D3895-05 *Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [12] Sharma HD, Lewis SP "Waste containment System, waste stabilization and landfills: design and evaluation", John Wiley & Sons, Inc., Nueva York
- [13] Hsuan YG, Koerner RM (1998) - *Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 532-541.
- [14] Giroud JP "Relationship between geomembranes density and carbon black content", In: *Geosynthetics International*, 1, No.1, 1995
- [15] Hage Jr E, Departamento de Engenharia de Materiais (Dema) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos (SP) – *Comunicação Pessoal*, 2003.
- [16] Lodi PC *Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (pead) e de poli cloreto de vinila (pvc)*, Tese de Doutorado, São Carlos, Brasil, Universidade de São Paulo, 2003
- [17] Rowe RK, Sangam HP "Durability of HDPE geomembranes", Review Article, *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 77 (2002)
- [18] GRI Test Method GM13-06 *Standard specification for test methods, test properties and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes*.