

Degradação de Membrana Impermeabilizante de Polietileno de Alta Densidade Usada em Tanques de Armazenamento de Vinhaça

Fernando Luiz Lavoie, Benedito de Souza Bueno
Escola de Engenharia de São Carlos, USP

Paulo César Lodi
Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP

Resumo: Membranas impermeabilizantes de polietileno de alta densidade (PEAD) são utilizadas como revestimento em tanques de armazenamento de vinhaça (resíduo da cana-de-açúcar), onde esse resíduo é lançado a temperaturas médias de 80-90 °C. Devido a essas temperaturas elevadas e à acidez do resíduo, essas membranas podem degradar, fissurar e perder a função para a qual foram projetadas vindo a contaminar o solo e o lençol freático. Este trabalho avaliou o efeito da vinhaça em membranas de PEAD após 4 meses de exposição em ambiente controlado. De forma complementar, utilizou-se também um líquido agressivo de pH básico (soda cáustica). Objetivou-se avaliar a resistência da membrana em contato com esses resíduos (ácido e básico). Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas, teor de negro de fumo e análise termogravimétrica (TGA) para quantificar a degradação das membranas poliméricas frente aos resíduos químicos utilizados. Os resultados mostram, por exemplo, que enquanto a soda cáustica provocou pequena variação nas propriedades físicas, a vinhaça alterou a espessura do material em 7,8%. Analisando-se a imersão na vinhaça, verificou-se uma diminuição média na resistência e deformabilidade (escoamento) de 34% e 23,5%, respectivamente. Houve um aumento médio na rigidez de 7,8% e uma pequena diminuição na resistência média ao rasgo (2,7%).

Palavras-chave: Membrana de PEAD, propriedades físicas e mecânicas, negro de fumo, análise térmica (TGA).

Degradation of Impermeable Membrane from High-Density Polyethylene Used in Vinasse Storage Tanks

Abstract: High-density polyethylene (HDPE) water-proof membranes are used as coatings in vinasse (leachate from sugar cane) storage tanks. The leachate is pumped into the tanks at temperatures of 80-90 °C. Due to these high temperatures and acidity of the waste, these membranes can be degraded, cracked and then loose the function for which they have been designed. This may cause contamination of the soil and groundwater. This study evaluated the effect of vinasse in HDPE membranes after 4 months of exposure in a controlled environment. An aggressive, alkaline pH liquid (sodium hydroxide) was also used. The objective was to evaluate the membrane resistance in contact with acidic and alkaline residues. Physical and mechanical tests, measurement of the carbon black content and thermo gravimetric analysis (TGA) were used to determine degradation of polymer membranes after chemical immersion. While sodium hydroxide resulted caused only minor changes in the physical properties, vinasse induced a thickness change of 7.8%. With immersion in vinasse, an average decrease in strength and deformability (yield) of 34% and 23.5% were measured, respectively. The stiffness increased by 7.8% (average) and the tear strength decreased by 2.7% (average).

Keywords: HDPE membranes, physical and mechanical properties, carbon black, thermal analysis (TGA).

Introdução

Membranas poliméricas tem sido utilizadas em aplicações de engenharia (geotécnica e/ou ambiental) com diversas funções. Uma das principais funções é atuar como barreira para líquidos e/ou vapores devido à sua baixa permeabilidade que é da ordem de 10^{-11} cm/s^[1-3]. Em sistemas de impermeabilização da base e cobertura de aterros sanitários, por exemplo, as membranas mais utilizadas são as de PEAD, devido principalmente à sua alta resistência química. Devido à sua utilização em obras ambientais e de contenção, as membranas entram

em contato direto com produtos químicos podendo alterar suas propriedades de resistência e de desempenho comprometendo sua estanqueidade e, portanto, do sistema como um todo. Com a exposição química, pode ocorrer uma alteração na composição do material, cujas propriedades mecânicas podem também se alterar. Efeitos sinérgicos aumentam o nível de degradação do material se sujeito a altas temperaturas e quando sob tensões mecânicas durante tempo prolongado^[4]. Quanto mais agentes agressivos atuarem simultaneamente,

mais a membrana será atacada e, conseqüentemente, menor será sua resistência. Dessa forma, a primeira etapa em um projeto com membranas é a verificação de sua compatibilidade química. As principais normas específicas para avaliação da resistência química dessas membranas são a EPA 9090 (USEPA)^[5], ASTM D5747^[6], ISO 12960^[7] e EN 14414^[8]. Lodi & Bueno^[9] sugerem que o método brasileiro L1.030^[10] prescrito pela CETESB também pode ser utilizado para avaliar a compatibilidade de membranas em contato com resíduos.

As análises da compatibilidade entre a GM e o resíduo são baseadas na comparação entre as propriedades intactas e após imersão dos materiais por determinados períodos. As principais análises envolvem as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais poliméricos. Usualmente, uma geomembrana de PEAD possui a seguinte composição: 96-98% (resina); 2-3% (negro de fumo ou pigmentos) e 0,25-1,0% (aditivos). Diversos autores têm relatado as variações que geralmente ocorrem nessas avaliações^[11-19]. Pesquisas de campo e laboratório foram realizadas também para mostrar que as geomembranas degradam com o tempo e ilustrar os diferentes aspectos da compatibilidade química^[20-26]. As principais conclusões dessas pesquisas são de que as membranas não devem apenas resistir quimicamente aos resíduos e contaminantes, mas também devem manter-se química e mecanicamente estáveis (duráveis) ao longo de sua vida útil. Outros trabalhos^[21,22,24,27-29] apresentam discussões sobre a severidade do envelhecimento em função do tempo de exposição em função dos resíduos e da temperatura de incubação.

Em usinas de produção de álcool, as membranas são utilizadas em canais e tanques de armazenamento da vinhaça. A depender das condições tecnológicas da destilaria, para cada litro de álcool produzido, a quantidade despejada de vinhaça por litro de álcool pode variar de 10 a 18 litros. A temperatura da vinhaça que sai dos aparelhos de destilação é de 85 a 90 °C e seu lançamento tem sido estudado com ênfase nos efeitos no pH do solo, propriedades físico-químicas e na cultura da cana-de-açúcar. No contexto ambiental a aplicação de vinhaça vem sendo contestada pelos seus efeitos no solo e nas águas subterrâneas.

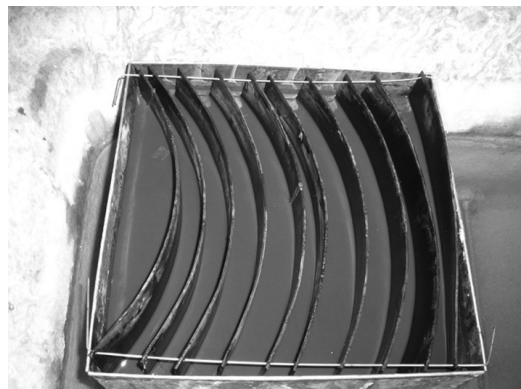
A norma P4.231 da CETESB^[30] define a vinhaça como um líquido derivado da destilação do vinho, que é resultante da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou melaço. Essa mesma norma prescreve os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça no solo. Dentre estes, está a profundidade do nível d'água do aquífero livre, no momento de aplicação de vinhaça que deve ser, no mínimo, de 1,50 m (um metro e cinquenta centímetros). A norma refere-se ainda aos tanques de armazenamento de vinhaça. Estes deverão ser impermeabilizados com geomembrana (GM) impermeabilizante ou outra técnica de igual ou superior efeito. A norma enfatiza também que os canais mestres ou primários de uso permanente para distribuição de vinhaça durante o período da safra deverão ser impermeabilizados com geomembrana impermeabilizante ou outra técnica de igual ou superior efeito.

Dentro desse contexto, esse trabalho avaliou a compatibilidade química de membranas de polietileno de alta densidade (PEAD) expostas à vinhaça tendo-se em vista que esta é lançada a 90 °C sobre a geomembrana nos tanques de armazenamento. De forma complementar, utilizou-se também um líquido agressivo de pH básico (soda cáustica). O objetivo foi de avaliar a resistência da membrana em contato com esses resíduos por um período total de 4 meses em ambiente controlado. Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas, teor de negro de fumo e análise termogravimétrica (TGA) para avaliação da degradação das membranas poliméricas frente aos resíduos químicos utilizados.

Materiais e Métodos

Compatibilidade entre os resíduos e as membranas

A compatibilidade química foi realizada de acordo com os métodos de ensaio EPA 9090A^[5] e ASTM D5747^[6]. O método em si consiste em imergir amostras de membranas em uma solução química com temperatura de 50 °C (± 2 °C) com o intuito de avaliar os efeitos químicos decorrentes desta exposição. Foram utilizados tanques de exposição constituídos de aço inoxidável, com dimensões de 300 mm de comprimento \times 300 mm de largura \times 350 mm de altura (Figuras 1a, b).



(a)



(b)

Figura 1. (a) Tanque de exposição com amostras devidamente distanciadas; (b) equipamento utilizado para aquecer as soluções químicas, contendo dois tanques de exposição.

Os líquidos utilizados foram os seguintes:

- Vinhaça (resíduo orgânico da produção industrial do álcool). A composição química da vinhaça está apresentada na Tabela 1;
- Solução de 10% em massa de soda cáustica (hidróxido de sódio (Na OH)) e 90% de água. No processo de produção da alumina (65% desta produção é destinada à fabricação do alumínio), a soda cáustica é utilizada para eliminar impurezas da bauxita minerada bem como atuar como base química na produção de papel, detergentes, dentre outras aplicações industriais.

O período de exposição das amostras foi de 2880 horas (120 dias). Após o período de exposição, as amostras foram devidamente enxaguadas com água e secas com toalhas de papel absorvente para remover qualquer líquido visível na superfície das amostras.

Material e ensaios realizados

Foram utilizadas membranas de polietileno de alta densidade (PEAD) de 2,0 mm de espessura fabricadas e comercializadas por empresa nacional. A CETESB (método L1.030)^[10] recomenda que essas mantas poliméricas apresentem espessura mínima de 1,5 mm. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas da ASTM, a saber: determinação da espessura (ASTM D5199)^[31], determinação da densidade (ASTM D792)^[32], propriedades de tração (ASTM D6693)^[33], resistência ao rasgo (ASTM D1004)^[34], resistência ao puncionamento (ASTM D4833)^[35], dispersão de negro de fumo (ASTM D5596)^[36] e ensaio de TGA (ASTM E1131)^[37].

Dispersão de negro de fumo

O ensaio permite a avaliação qualitativa de aglomerados de negro de fumo e outras inclusões em geossintéticos de poliolefinas. O método consistiu em duas etapas: a preparação de corpos de prova por meio de um cortador (Figura 2a) e, a avaliação microscópica dos corpos de prova. Os corpos de prova possuíam espessuras de 8 a 20 µm. A avaliação microscópica dos corpos de prova foi baseada na comparação visual entre campos microscópicos de visão obtidos com a utilização de um microscópio ótico binocular (Figura 2b) e um quadro de referência de micrografias de dispersão de negro de fumo (adjunto da ASTM D 5596)^[36]. Foram ensaiados 5 corpos de prova por amostra, com área aproximada de 2,54 cm² obtidos na direção longitudinal. Foram obtidas 10 leituras de campos microscópicos de visão por amostra ensaiada.

Análise termogravimétrica (ensaio de TGA)

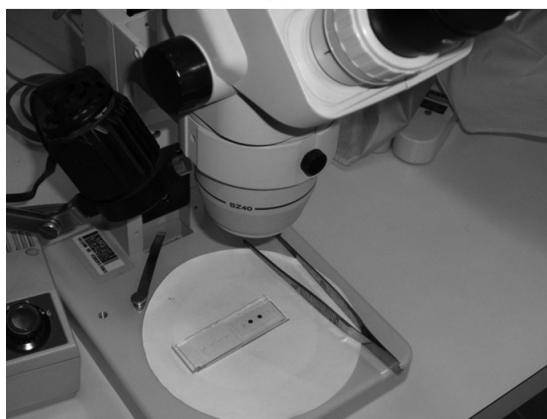
O equipamento utilizado neste ensaio possui um analisador termogravimétrico que permite a medida contínua da massa do corpo de prova de uma amostra com exatidão de 0,1 µg. Foram utilizados corpos de prova com massas de 10 a 15 mg aquecidos a razão de 20 °C/min. A primeira etapa do ensaio utilizou gás inerte (nitrogênio) aquecendo o corpo de prova até a temperatura de 560 °C. Esta temperatura foi mantida por 10 minutos. Nesta etapa do ensaio determinou-se a perda de massa correspondente ao polietileno. A segunda etapa do ensaio consistiu na injeção de gás reativo (ar) aquecendo-se o

Tabela 1. Caracterização da vinhaça utilizada.

Parâmetros	Resultados	Unidade
Condutividade Elétrica	4,83	mS
Dureza Total	5.600,0	mg/L
Nitrogênio Amonio	6,03	mg/L
Nitrogênio Nitrato	3,52	mg/L
Nitrogênio Nitrito	1,20	mg/L
pH	5,10	
Sódio	17,0	mg/L
Sulfato	283,0	mg/L
D.B.O.	10142	mg/L
D.Q.O.	37119	mg/L
Potássio	621	mg/L
Nitrogênio de Kjeldahl	418	mg/L
Fosfato	52,3	mg/L
Resíduo Não Filtrável Total	25000	mg/L
Cálcio	295,0	mg/L
Magnésio	188,00	mg/L



(a)



(b)

Figura 2. (a) Cortador de corpos de prova; (b) microscópio ótico binocular para avaliação microscópica dos corpos de prova.

corpo de prova até a temperatura de 800 °C para oxidar o negro de fumo. Nesta etapa determinou-se a quantidade de cinzas existente na amostra.

Resultados e Discussão

Ensaio físicos e mecânicos

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de propriedades físicas e mecânicas realizados com as membranas intactas e imersas em vinhaça e soda cáustica. As variações ocorridas nas propriedades podem ser visualizadas na Figura 3.

Os resultados da Tabela 2 mostram que a amostra imersa na vinhaça apresentou aumento de 7,80% na espessura, provavelmente promovido pela variabilidade da bobina. Já na densidade, a amostra mostrou variações irrelevantes (diminuição de 0,46%). Observa-se uma excessiva diminuição na resistência à tração no escoamento (41,02% na direção longitudinal e 27,24% na direção transversal), uma expressiva diminuição na deformação específica (29,75% na direção longitudinal e 17,20% na direção transversal) e um aumento no módulo de elasticidade (14,23% na direção longitudinal e 5,03% na direção transversal). O ensaio de rasgo mostrou que houve diminuição na força necessária para iniciar o rasgo da geomembrana na direção longitudinal (4,72%) e, ligeiro aumento (0,67%) na direção transversal. Os resultados do ensaio de punção apresentaram aumento de 7,86% na resistência ao punção.

Tabela 2. Resultados comparativos dos ensaios físicos e mecânicos realizados.

Propriedade	Intacta	Imersa em vinhaça	Imersa em soda cáustica
Espessura (mm)	2,032	2,191	2,017
Densidade	0,9492	0,9448	0,9432
σ (MPa)	18,43	12,15	16,32
ϵ (%)	18,42	14,06	16,52
E (MPa)	329,95	361,55	425,75
R (N)	309,15	302,95	188,40
P (N)	711,2	767,1	813,8

σ = resistência à tração (escoamento); ϵ = deformação específica (escoamento); E = módulo de elasticidade (escoamento); R = resistência ao rasgo; P = resistência ao punção.

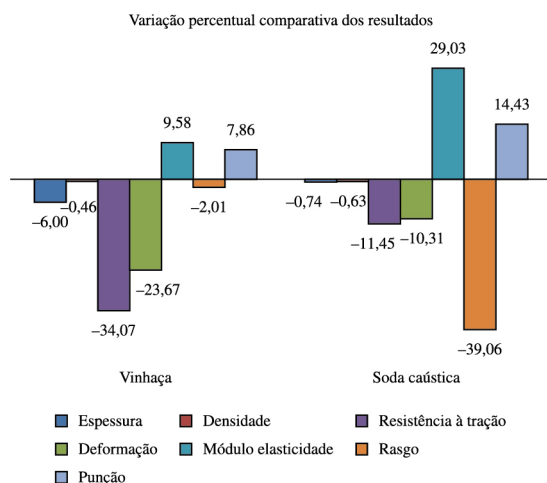


Figura 3. Variação percentual dos resultados obtidos após exposição em vinhaça e em soda cáustica.

Com relação à amostra imersa em soda cáustica, notam-se variações irrelevantes na espessura (diminuição de 0,74%) e na densidade (diminuição de 0,63%). No comportamento em tração no escoamento, percebe-se uma diminuição na resistência à tração (3,00% na direção longitudinal e 19,96% na direção transversal) e na deformação específica (13,16% na direção longitudinal e 7,34% na direção transversal). Em vista destes resultados, houve aumento expressivo no módulo de elasticidade da geomembrana (27,48% na direção longitudinal e 30,56% na direção transversal). Os resultados dos ensaios de rasgo apresentaram diminuição na força necessária para iniciar o rasgo da geomembrana nas direções longitudinal (41,34%) e transversal (36,81%). Os resultados do ensaio de punção mostraram aumento de 14,43% na resistência ao punção.

Ensaio de dispersão de negro de fumo

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de dispersão de negro de fumo realizados em 5 corpos de prova para as amostras nas condições intactas (virgem) e após exposição à soda cáustica e vinhaça.

Os resultados obtidos demonstram que todos os corpos de prova se enquadraram na categoria I, que compreende partículas de negro de fumo de geometrias circulares com diâmetros menores ou iguais a 35 μ m. A partir dos resultados obtidos destes ensaios, não foi possível verificar indícios de degradação nas amostras.

Ensaio de TGA (Análise termogravimétrica)

Os parâmetros obtidos a partir dos resultados destes ensaios podem ser vistos na Tabela 4. Foram obtidas as porcentagens de cada componente da geomembrana, assim como as temperaturas de decomposição do polietileno com 5% e 50% de perda de massa.

Observou-se uma quantidade de negro de fumo adicionada ao PEAD para a amostra virgem (1,78%) inferior ao que prescreve a GM 13 (GRI)^[38] donde as geomembranas devem apresentar de 2 a 3% de

Tabela 3. Resultados dos ensaios de dispersão de negro de fumo.

Campo microscópico de visão	Amostras			Observação
	Intacta	Soda cáustica	Vinhaça	
1	Cat. I	Cat. I	Cat. I	-
2	Cat. I	Cat. I	Cat. I	-

Tabela 4. Parâmetros obtidos a partir dos resultados dos ensaios de TGA.

Parâmetro	Unidade	Intacta	Soda cáustica	Vinhaça
Polietileno	%	97,95	97,82	97,85
Negro de fumo + cinzas	%	2,05	2,18	2,15
Negro de fumo	%	1,78	2,17	2,00
Cinzas	%	0,27	0,014	0,15
Temperatura com 5% de perda de massa	°C	426,42	428,59	427,47
Temperatura com 50% de perda de massa	°C	476,79	474,80	473,18

negro de fumo. A amostra exposta à soda cáustica apresentou em sua composição uma quantidade de cinzas ligeiramente inferior quando comparada à amostra virgem. As temperaturas de decomposição do polietileno apresentaram pequenas variações (aumento de 0,51% para a temperatura com 5% de perda de massa e diminuição de 0,42% para a temperatura com 50% de perda de massa) quando comparadas à amostra virgem. Para a amostra exposta à vinhaça, as temperaturas de decomposição do polietileno apresentaram pequenas variações (aumento de 0,25% para a temperatura com 5% de perda de massa e diminuição de 0,76% para a temperatura com 50% de perda de massa) quando comparadas à amostra virgem.

De forma geral, percebe-se que a vinhaça afetou mais significativamente as membranas em alguns aspectos. Enquanto a soda cáustica provocou uma pequena variação (insignificante) nas propriedades físicas, a vinhaça alterou a espessura do material em cerca de 7,8%. Os parâmetros de resistência no escoamento (parâmetros que são usados em projetos) sofreram pouca alteração em contato com a soda cáustica. Houve, no entanto, um aumento médio de rigidez de 30%, ou seja, o material tornou-se mais rígido. Analisando a imersão na vinhaça, verifica-se uma diminuição média na resistência e deformabilidade (escoamento) de 34% e 23,5%, respectivamente. Houve um aumento médio na rigidez de 7,8% e uma pequena diminuição na resistência média ao rasgo (2,7%). Deve-se levar em conta que as geomembranas ficaram expostas por 120 dias nesses resíduos à temperatura de 50 °C e o efeito esperado era de que realmente os materiais apresentassem alterações em suas propriedades. O importante dessa análise é avaliar se existe uma tendência de comportamento das propriedades das geomembranas em contato com os resíduos. De certa forma, percebe-se que o material apresenta perda de resistência e deformabilidade com a exposição, mas que não chega a comprometer o desempenho do material tendo em vista que a literatura corrente^[1,2,29] referem-se a essas variações dentro de limites aceitáveis. Outro fator importante é que as análises térmicas mostraram que a composição da geomembrana não está de acordo com os padrões exigidos. Esse fato pode alterar as propriedades de resistência do material ainda mais sob efeito pronunciado de temperatura como acontece com a vinhaça ao ser lançada sobre a geomembrana. Em espessuras menores que esta analisada, pode ocorrer perda gradual de resistência e comprometimento da função do material.

Conclusão

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho conclui-se que:

- Não houve variação significativa para a densidade e espessura das membranas após a exposição aos dois resíduos utilizados;
- Para a amostra imersa em soda cáustica, observou-se expressiva perda de resistência à resistência ao rasgo;
- Para a amostra imersa em vinhaça, observou-se expressiva perda de resistência à tração no escoamento e uma pequena perda de resistência ao rasgo;

- As variações das propriedades de resistência e deformabilidade no escoamento foram mais pronunciadas quando em contato com a vinhaça;
- As variações ocorridas na resistência ao puncionamento não foram expressivas após a imersão das geomembranas aos dois resíduos;
- Os ensaios de dispersão de negro de fumo e de TGA não conseguiram detectar evidências de degradação nas amostras após as exposições;
- No geral, as variações ocorridas nas amostras demonstram que o ensaio acelerado foi útil para promover a degradação das membranas poliméricas imersas em vinhaça e soda cáustica e, portanto, servir de parâmetro para análises futuras bem como avaliar a tendência de comportamento dos materiais expostos.

Referências Bibliográficas

1. Costa, C. M. L.; Lodi, P. C.; Costa, Y. D. J. & Bueno, B. S. - Polímeros, **18**, p.158 (2008). <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000200014>
2. Lodi, P. C. - “Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade e de poli cloreto de vinila”, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil (2003).
3. Rowe R. K.; Rimal S. & Sangam H. - *Geotext Geomembranes*, **27**, p.137 (2009). <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.09.007>
4. Koerner, R. M.; Halse, Y. H. & Arthur, E. L. - “Long Term Durability and Aging of Geomembranes”, Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance, Edited by Rudolph Bonaparte (1992).
5. Environmental Protection Agency – EPA - “Method 9090: Compatibility Tests for Wastes and Membrane liners in EPA SW-846”, Test Methods for Evaluating Solid Waste, U.S. Environmental Protection Agency, Washington (1990).
6. American Society for Testing and Materials - ASTM - “D5747: Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids”, ASTM, West Conshohocken (2008).
7. International Organization for Standardization – ISO - “ISO/TR 12960: Geotextiles and geotextile-related products -- Screening test method for determining the resistance to liquids”, ISO (1998).
8. British Standards - BS - “EN 14414: “Geosynthetics. Screening test method for determining chemical resistance for landfill applications”, BS (2004).
9. Lodi, P. C. & Bueno, B. S. - “Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics”, Nice, p.523-526 (2003).
10. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental - CETESB – “Método L1.030: Membranas impermeáveis e resíduos – avaliação da compatibilidade”, Cetesb (1990).
11. Dudzik, B. E. & Tisinger, L. G. - “Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications”, ASTM STP 1081, Robert M. Koerner (ed.), ASTM, Philadelphia (1990).
12. Artieres, O.; Gousse, F. & Prigent, E. - *Proceed. Sardinia*, **91**, p.587 (1991).

13. Ozsú, E. & Acar, Y. B. - *Geotext. Geomembranes*, **11**, p.291, (1992). [http://dx.doi.org/10.1016/0266-1144\(92\)90005-U](http://dx.doi.org/10.1016/0266-1144(92)90005-U)
14. Overmann, L. K.; Cowland, J. W.; Mattravers, N. K.; Shung, W. K.; Lee, B. S. & Wan, C. H. - *Proceed. Sardina*, **93**, p.333 (1993).
15. Surmann, R.; Pierson, P. & Cottour, P. - *Proceed. Sardina*, **95**, p.405 (1995).
16. Duquennoi, C.; Bernhard, C. & Gaumet, S. - *Proceed. Sardina*, **95**, p.397 (1995).
17. Lord, A. & Halse, J. - *Proceed. Sardina*, **95**, p.387 (1995).
18. Gumargalievá, K. Z.; Ivanov, V. B.; Zaikov, G. E.; Moiseev, Ju. V. & Pokholok, T. V. - *Polym. Degrad. Stab.*, **52**, p.73 (1996). [http://dx.doi.org/10.1016/0141-3910\(95\)00209-X](http://dx.doi.org/10.1016/0141-3910(95)00209-X)
19. Maisonneuve, C.; Pierson, P.; Duquennoi, C. & Morin, A. - "Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics", v.1, p.355-358, Industrial Fabric Association International, St Paul (1998).
20. Hsuan, Y. G.; Lord Junior A. E. & Koerner, R. M. - "Proceeding of Geosynthetics", Atlanta, p.287-302 (1991).
21. Hsuan, Y. G. & Koerner, R. M. - *J. Geotech. Geoenviron.*, **124**, p.532 (1998). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:6\(532\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:6(532))
22. Sangam, H. P. & Rowe, R. K. - *Can. Geotech. J.*, **39**, 1221, (2002). <http://dx.doi.org/10.1139/t02-074>
23. Rowe, R. K.; Quigley, R. M.; Brachman, R. W. I. & Booker, J. R. - "Barrier Systems for Waste Disposal Facilities", 2nd ed, Spon Press, 587p. (2004).
24. Rimal, S.; Rowe, R. K. & Hansen, S. - "Proceedings of 57th Canadian Geotechnical Conference", BiTech Publishing Ltd, Richmond, British Columbia, Section 5D, p.13-19 (2004).
25. Rowe, R. K. - *Geotechnique*, **55**, p.631 (2005). <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2005.55.9.631>
26. Stark, T. D.; Choi, H. & Diebel, P. W. - "Geo-Frontiers", Rathje E.M. (ed.), *Geotechnical Special Publication 130-142* (2005).
27. Gulec, S. B.; Edil, T. B. & Benson, C.H. - *Geosynth. Int.*, **2**, p.60, (2004). <http://dx.doi.org/10.1680/gein.2004.11.2.60>
28. Rowe, R. K. & Hoor, A. - *Geosynth. Int.*, **16**, p.71 (2009). <http://dx.doi.org/10.1680/gein.2009.16.2.71>
29. Rowe, R. K.; Rimal, S.; Arnepalli, D. N. & Bathurst, R. J. - *Geotext. Geomembranes*, **28**, p.100, (2010). <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.10.012>
30. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental - CETESB - "P4.231: Vinhaça: Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola", Cetesb, 12p. (2006).
31. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM D5199: Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes", ASTM, West Conshohocken (2006).
32. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM D792: Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement", ASTM, West Conshohocken (2008).
33. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM D6693: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes", ASTM, West Conshohocken (2010).
34. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM D1004: Test Method for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting", ASTM, West Conshohocken (2009).
35. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM D4833: Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes and Related Products", ASTM, West Conshohocken (2007).
36. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM D5596: Standard Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics", ASTM, West Conshohocken (2003).
37. American Society for Testing and Materials - ASTM - "ASTM E1131: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry", ASTM, West Conshohocken (2008).
38. Geosynthetic Research Institute - "GM13: Test Properties, Testing Frequency and Recommended Warranty for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes", GSI, Folsom (2003).

Enviado: 24/08/12
Aceito: 01/11/12