

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DANOS NA PERMEAÇÃO E DIFUSÃO DE GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS

J. B. MELLO¹, F. L. LAVOIE², P. C. LODI³

Universidade Estadual Paulista^{1,3}, Instituto Mauá de Tecnologia²

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4627-5064>¹

julia_bmello@hotmail.com¹

Submetido 30/06/2020 - Aceito 14/09/2021

DOI: 10.15628/holos.2020.10619

RESUMO

As geomembranas têm sido empregadas com o objetivo de impermeabilizar e proteger o solo e também os lençóis freáticos e mananciais. No entanto, durante o processo de instalação estas podem tornar-se suscetíveis à ocorrência de danos mecânicos (furos, microfuros e/ou rasgos). Dessa forma, os parâmetros de permeabilidade/permeação podem ser afetados e, caso ocorram vazamentos, fugas ou pequenas imperfeições que aumentem o fluxo através da geomembrana, a obra toda terá perdido sua função levando à falência do projeto. Nesse contexto, torna-se imprescindível o estudo da permeação e do processo difusivo em geomembranas poliméricas, permitindo garantir que suas propriedades estejam dentro dos parâmetros para qual foi projetada. Assim, essa pesquisa avaliou as propriedades de permeação e difusão de geomembranas de polietileno de

alta densidade (PEAD) e poli cloreto de vinila (PVC) nas espessuras de 1,0 mm quando em contato com água e hidrocarbonetos. Foram avaliadas geomembranas intactas e com danos induzidos (microfuros, furos e por processos de abrasão). Os ensaios de permeação foram realizados de acordo com as recomendações da ASTM E96. O ensaio de difusão foi realizado com equipamento desenvolvido e com o auxílio da técnica de cromatografia gasosa. Para tanto foram avaliados dois tipos de solos locais (arenoso e argiloso). Os principais resultados mostram que os danos causados às geomembranas influenciaram significativamente os valores de permeação. A cromatografia gasosa mostrou-se extremamente eficaz na detecção de compostos do tipo BTEX.

PALAVRAS-CHAVE: Geomembrana, permeação, BTEX, cromatografia gasosa.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DAMAGE ON THE PERMEATION AND DIFFUSION OF POLYMERIC GEOMEMBRANES

ABSTRACT

Geomembranes have been used in order to waterproof and protect the soil, as well as groundwater and water sources. However, during the installation process they can become susceptible to the occurrence of mechanical damage (holes, micro-holes and / or tears). In this way, the permeability/permeation parameters can be affected and, in the event of leaks, leaks or small imperfections that increase the flow through the geomembrane, the entire work will have lost its function leading to the failure of the project. In this context, it is essential to study the permeation and the diffusive process in polymeric geomembranes, allowing to guarantee that their properties are within the parameters for which it was designed. Thus, this research evaluated the

permeation and diffusion properties of high-density polyethylene (HDPE) and polyvinyl chloride (PVC) geomembranes in thicknesses of 1.0 mm when in contact with water and hydrocarbons. Intact and induced damage geomembranes (micro-holes, holes and abrasion processes) were evaluated. Permeation tests were performed according to the recommendations of ASTM E96. The diffusion test was performed with equipment developed and with the aid of gas chromatography. For this purpose, two types of local soils (sandy and clayey) were evaluated. The main results show that the damage caused to the geomembranes significantly influenced the permeation values. Gas chromatography proved to be extremely effective in detecting BTEX-type compounds.

KEYWORDS: Geomembrane, permeation, BTEX, gas chromatography.



1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da frota de veículos, principalmente nos grandes centros urbanos, o número de postos de abastecimento também aumentou, gerando maiores probabilidades de ocorrência de vazamentos em tanques de armazenamento. Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), presentes nos combustíveis automotivos, gasolina e óleo diesel, compõem um importante grupo de contaminantes que resulta em grandes prejuízos à saúde humana. Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno (BTEX) destacam-se por serem extremamente tóxicos, mesmo em pequenas concentrações, podendo ocasionar até mesmo lesões no sistema nervoso central (Valentin, 2008; Marçal, 2012). De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em 2014 havia um total de 4771 áreas contaminadas no estado, sendo o setor de postos de combustíveis responsável por 3597 (75% do total) dos casos. Os compostos BTEX, presentes nos combustíveis e altamente tóxicos, fez com que a legislação se tornasse cada vez mais restritiva. No Brasil, as portarias Nº 518, de 25 de março de 2004, e Nº 2914, de 12 de dezembro de 2011, determinam que, para a água ser considerada potável, ou como foi definida, “água para consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde”, os limites máximos permitidos para Benzeno, Tolueno e Xileno devem ser de 0,005, 0,17 e 0,3 mg/L, respectivamente.

O processo de conscientização de que os diversos tipos de substâncias e resíduos em contato com o solo e águas subterrâneas precisam de armazenamento adequado fez com que as áreas de disposição de resíduos, lagoas de armazenamento e tratamento de efluentes industriais, resíduos de mineração e tanques de armazenamento de substâncias sejam cada vez mais utilizados. Os materiais geossintéticos, em especial as geomembranas (GM), que são materiais poliméricos com reduzida condutividade hidráulica, têm sido empregados nessas obras no controle de fluxo e na garantia de estanqueidade com o objetivo de impermeabilizar e proteger, não apenas os solos, mas também os lençóis freáticos e mananciais. No entanto, durante o processo de instalação, a pequena espessura das geomembranas pode sofrer com o contato com materiais protuberantes (pedras e/ou raízes), tráfego de equipamentos, processos de instalação, queda de ferramentas, entre outros fazendo com que estas tornem-se suscetíveis à ocorrência de danos mecânicos (furos, microfuros e/ou rasgos). Dessa forma, os parâmetros de permeabilidade/permeação podem ser afetados e, caso ocorram vazamentos, fugas ou pequenas imperfeições que aumentem o fluxo através da geomembrana (GM), a obra toda terá perdido sua função, levando à falência do projeto. Nesse contexto, torna-se imprescindível o estudo da permeação e do processo difusivo em geomembranas poliméricas, permitindo garantir que suas propriedades estejam dentro dos parâmetros para qual foram projetadas. Assim, essa pesquisa avaliou a influência de danos induzidos na permeação e difusão de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e poli cloreto de vinila (PVC) em obras geotécnicas e ambientais, quando em contato com água e hidrocarbonetos.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Hidrocarbonetos

Hidrocarbonetos são compostos químicos formados apenas por átomos de carbono e hidrogênio. Estão presentes no meio ambiente como constituintes da matéria orgânica de origem animal e vegetal e também como principais componentes dos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) (Kaipper, 2003).

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos representam uma família de compostos orgânicos semivoláteis arranjados por dois ou mais anéis aromáticos condensados. São conhecidos mais de 100 desses compostos, mas apenas 16 (Figura 1) são considerados prioritários no monitoramento ambiental de poluentes orgânicos persistentes realizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA). Por serem capazes de reagir diretamente ou sofrerem transformações metabólicas com o DNA, podendo tornar-se potenciais carcinogênicos. De acordo com a classificação da Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC), Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno e Dibenzo[a,h]antraceno são prováveis carcinogênicos para humanos.

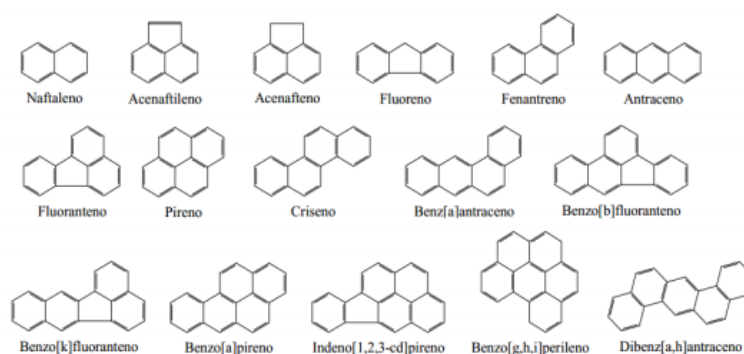


Figura 1: Diferentes técnicas de emendas em Geomembranas.

Fonte: Anjos (2012).

Os hidrocarbonetos monoaromáticos são compostos voláteis arranjados em um anel aromático condensado e possuem grande importância no contexto ambiental devido à sua alta mobilidade e toxicidade (USEPA).

Tendo em vista sua solubilidade e volatilidade, os BTEX são os hidrocarbonetos dos combustíveis líquidos derivados de petróleo com maior mobilidade no meio ambiente, podendo ser transportados rapidamente por meio do solo e da água subterrânea. Tanto a Agência Internacional de Pesquisa do Câncer quanto a Agência Norte-Americana de Saúde e Segurança Ocupacional, incluem os BTEX em suas listas de produtos cancerígenos e mutagênicos, por possuírem efeitos rápidos e que podem conduzir a envenenamento severo (Costa et al., 2009).

2.2 Geomembranas (GM)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), norma NBR 12553, a geomembrana (GM) pode ser definida como um produto bidimensional, de pequena espessura, variando entre 0,5 e 5 mm, e baixíssima permeabilidade, da ordem de 10^{-11} a 10^{-13} cm/s, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação. As geomembranas possuem características ideais para serem empregadas em estruturas de deposição de resíduos, já que proporcionam um sistema de barreira de controle e desvio de fluxo na fundação, evitando a transmissão de substâncias contaminantes para o solo e águas subjacentes. Contudo, alguns cuidados devem ser tomados, não apenas no processo de instalação, mas também com relação aos materiais que entrarão em contato com a geomembrana, já que podem ocorrer danos por punção, tensão ou deformações indesejadas, gerando vazamentos por meio de microfuros e pequenas imperfeições e, em casos mais graves, furos, comprometendo toda a obra.

Nosko et al. (1996) definem que 73% dos danos mecânicos são causados na fase de colocação da cobertura, 24% na fase de instalação da geomembrana e somente 3% após o período construtivo (Figura 2). Diversos outros autores estudaram os danos mecânicos que ocorrem em geomembranas (Rollin et. al., 1991; Nosko e Touze-Foltz, 2000; Peggs, 2001; Rollin et al., 1999; Lodi, 2003; Marçal, 2012).

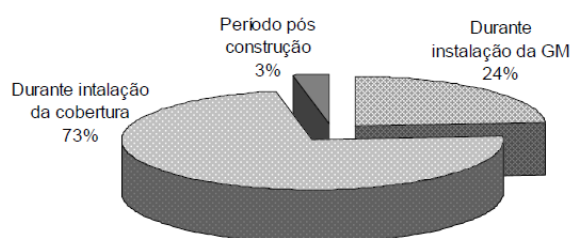


Figura 2: Causa de danos em geomembranas.

Fonte: Nosko et al. (1996).

2.3 Permeabilidade e permeação em geomembranas

A permeabilidade é a maior ou menor facilidade de um líquido permear o material. Na literatura, são encontrados diversos métodos de ensaios para a avaliação da permeabilidade de membranas poliméricas em contato com diferentes líquidos ou resíduos químicos. Alguns ensaios são adaptações daqueles usados em engenharia geotécnica, nos quais mede-se a permeabilidade da água por meio de geomembrana. Contudo, a carga hidráulica requerida é alta, o que além de não ser compatível com situações reais de campo, pode causar vazamentos ou problemas na amostra, adulterando os resultados. Sob cargas hidráulicas baixas, pode ocorrer evaporação da água devido a longa duração do ensaio.

Assim, pode-se realizar uma análise diferente, utilizando vapor d'água. Nesse ensaio, denominado Razão de Transmissão de Vapor d'água (WVT – sigla internacional) e realizado de acordo com a ASTM E96, a massa de vapor d'água que passa numa determinada área da

geomembrana – por um dado período de tempo e sob uma pressão específica que pode variar em cada ensaio – é igual a WVT (Equação 1). A partir desse valor e da pressão de vapor, que deve ser conhecida, é possível obter a permissividade e a permeança (Equação 3) por meio de correlações (Equação 2). Caso não se conheça a pressão de vapor, mas sejam fornecidas a temperatura e a umidade relativa do vapor, utiliza-se a Equação 4. Por fim, o coeficiente de permeabilidade é obtido pelo produto entre a permissividade e a espessura da geomembrana, de acordo com a Equação 5 (Marçal, 2012). A equação 1 pode ser denominada também de SVT quando a análise for realizada com solventes ou hidrocarbonetos.

$$WVT = \frac{M}{A.t} \quad (1)$$

$$WVT = \rho. \omega = \frac{\rho.\varphi}{g} \quad (2)$$

$$w = \frac{M}{A.p.t} \quad (3)$$

$$p = H.p_s \quad (4)$$

$$k = \varphi.T \quad (5)$$

Em que: M: massa de fluido que passa na geomembrana; A: área da geomembrana; t: período de tempo; p: pressão de vapor; ω : permeança; φ : permissividade; g: aceleração da gravidade; H: umidade relativa; p_s : pressão de vapor saturado a uma dada temperatura; k: permeabilidade; T: espessura da geomembrana.

3 METODOLOGIA

Foram utilizadas geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e poli cloreto de vinila (PVC) com espessura de 1,0 mm. Ambas as geomembranas foram fornecidas por empresas nacionais, na forma de bobinas, sendo necessário cortá-las e furá-las para a realização dos ensaios de permeação e de difusão. Ressalta-se que ambas as geomembranas foram utilizadas para o ensaio de permeação. No entanto, para o ensaio de difusão foi utilizada apenas a geomembrana de PEAD pelo fato da geomembrana de PVC não ser resistente a hidrocarbonetos. Os hidrocarbonetos usados, gasolina e óleo diesel, são de postos de gasolina de procedência local, da cidade de Bauru (SP). Estes foram devidamente transportados em galões próprios para essa função e armazenados em segurança.

3.1 Permeação

Para a realização do ensaio de permeação foram utilizados recipientes de alumínio com 75 mm de diâmetro, alargados e furados nas bordas para permitir posterior encaixe da geomembrana e fixação dos parafusos (Figura 3). As geomembranas foram ensaiadas nas condições intactas e com danos induzidos (microfuros, furos e danos por abrasão). Nos ensaios com microfuros (imperfeições com dimensão menor que a espessura) foi utilizada uma agulha com 0,7 mm para danificar a geomembrana. Já para os furos (imperfeições com dimensão maior que a espessura), utilizou-se a furadeira com broca de 1,8 mm de diâmetro. Por fim, para o ensaio de geomembrana com abrasão,



foi necessário um cilindro de compactação com peso de 4,5 Kg, 5 cm de diâmetro e altura da haste de 45 cm. A geomembrana foi colocada dentro do cilindro e coberta com uma camada de brita número 1. Em seguida, aplicaram-se oito golpes distribuídos por sua superfície, danificando-a sem ocasionar microfuros ou furos (Figura 4).

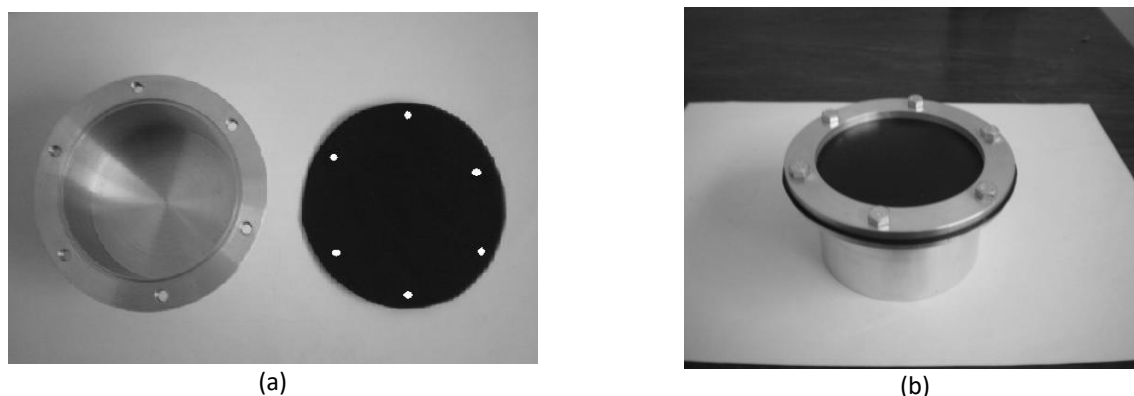


Figura 3: Detalhe da montagem dos corpos de prova.

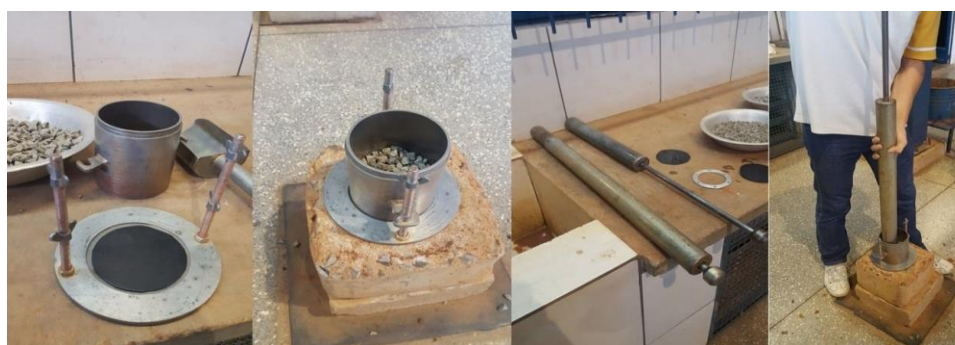


Figura 4: Detalhe do processo de abrasão das geomembranas.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB/UNESP) de acordo com as recomendações da norma ASTM E96. Para tanto, os ensaios de permeação nas geomembranas de PEAD e de PVC foram realizados utilizando-se água, gasolina e óleo diesel para cada condição (intacta e com danos induzidos). Cada ensaio foi realizado com 3 recipientes, totalizando-se 72 recipientes (36 para PEAD e 36 para PVC). As cápsulas foram preenchidas inicialmente com 200 g de líquido e deixadas em ambiente controlado (temperatura e umidade constantes). Em seguida, estas foram pesadas diariamente por vinte dias em balança de alta precisão (4 casas digitais) e, a partir dos valores obtidos, efetuou-se o cálculo da razão de transmissão de vapor (WVT), permeância e permeabilidade por meio das equações 1 a 5 definidas anteriormente.

3.2 Difusão

Para a realização do ensaio de difusão foram construídos recipientes de alumínio (permeômetros) com o objetivo de simular um sistema de isolamento com um ambiente

contaminado. Os permeâmetros, que possuem formato de tronco cilíndrico e diâmetro interno de, aproximadamente 93 mm, são alargados e furados nas bordas para posterior encaixe da geomembrana e a fixação dos parafusos. Uma de suas partes é totalmente fechada, enquanto a outra possui uma abertura que permite a retirada de amostras de água para análise em laboratório (Figura 5). Foram utilizados dois tipos de solo, arenoso e argiloso, ambos de procedência local (Bauru/SP). A utilização dos dois tipos de solos permite uma interessante comparação dos resultados, já que, por um lado, o solo arenoso possui partículas mais grosseiras, apresentando maior facilidade de liberar componentes em seus vazios e, por outro, o solo argiloso possui argilominerais que apresentam maior interação com moléculas de contaminantes. Nesta etapa da pesquisa foi utilizada apenas a geomembrana de PEAD nas condições intactas e com danos induzidos. Excetuando-se o dano por furo que utilizou furadeira com broca de 2,5 mm de diâmetro, os demais danos foram induzidos de forma idêntica àqueles do ensaio de permeação.

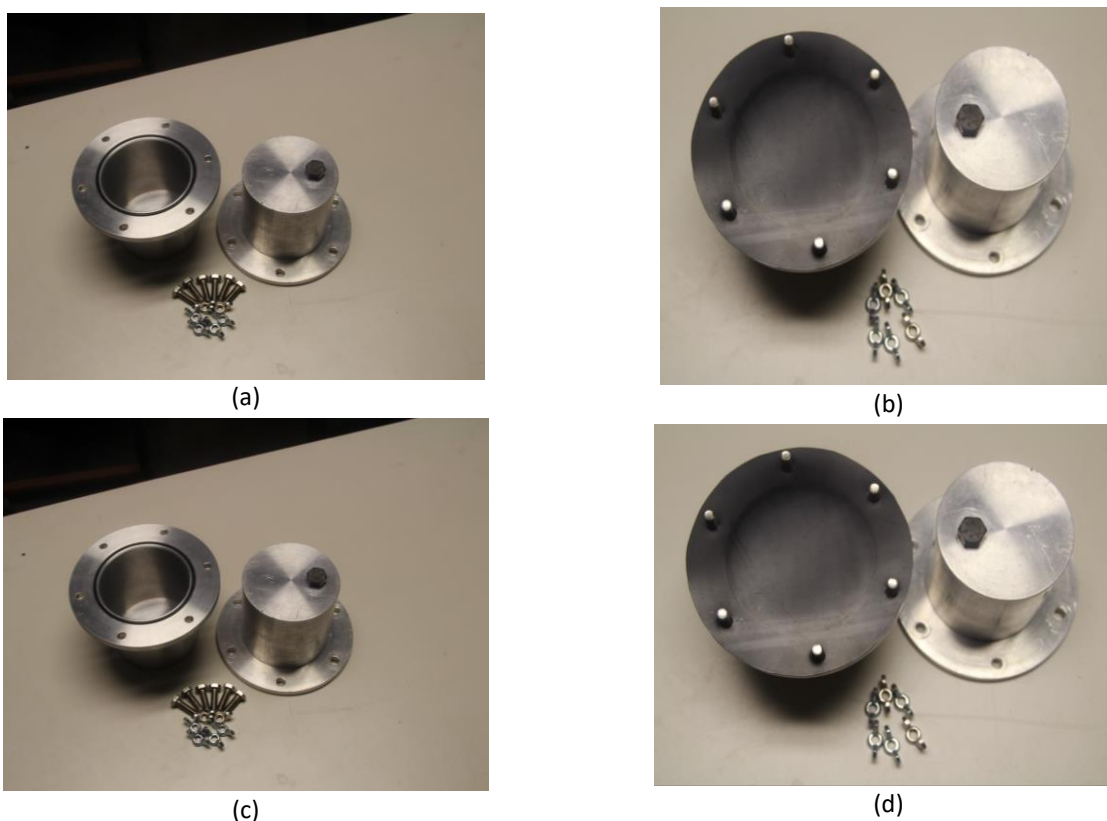


Figura 5: Detalhe da montagem dos corpos de prova (a) permeâmetro bipartido (b) detalhe da colocação da geomembrana (c) permeâmetro montado (d) amostras na horizontal e retirada de água para análise.

Em um dos compartimentos do recipiente foi introduzido 400 g de solo (arenoso ou argiloso), contaminado com 400 ml de hidrocarboneto (gasolina ou óleo diesel). Em seguida, posicionou-se a geomembrana, previamente cortada e furada, na interface do permeâmetro e a outra extremidade (com furo para retirada das amostras de água) foi colocada em cima do conjunto e fixada pelos parafusos (Figura 5b). Por último, por esse furo, com o auxílio de um funil, adicionou-se 400 ml de água destilada deionizada. O dispositivo, já fechado, foi mantido na horizontal, possibilitando a

comunicação, tanto do compartimento com solo e contaminante, quanto da câmara de água, com a membrana (Figura 5d). Cerca de 20 a 25 ml de amostras de água contaminada foram recolhidas mensalmente, durante um período de cinco meses, utilizando-se uma pipeta de 5 ml e encaminhadas ao Laboratório de Química Analítica e Cromatografia Gasosa da Faculdade de Ciências de Bauru (FC/UNESP) para que, posteriormente, fossem verificadas as concentrações de substâncias contaminantes presentes na água. Os valores de solo, contaminante e água foram obtidos com base em experiências anteriores, adequando-se para que houvesse quantidade suficiente para a realização das análises. Ao total foram avaliadas 16 amostras, sendo 8 para o solo arenoso e 8 para o solo argiloso. Cada solo foi avaliado em função do tipo de hidrocarboneto (gasolina ou óleo diesel) e da condição da geomembrana (intacta ou com dano induzido).

3.3 Cromatografia gasosa

A cromatografia gasosa foi utilizada para verificar a contaminação na água por BTEX (Figura 6). A técnica de separação utilizada exige a preparação das amostras para que a análise possa ser feita sem interferência de resíduos.

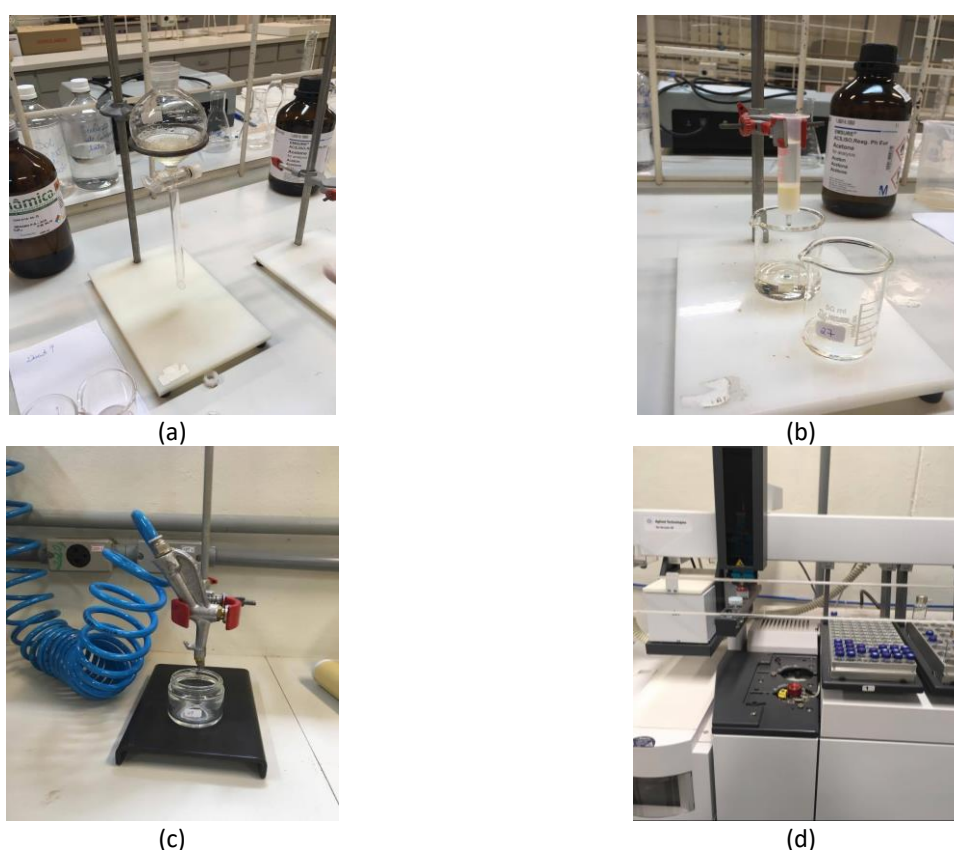


Figura 6: Detalhe do ensaio de cromatografia gasosa (a) extração líquido-líquido (b) coluna de forisil (c) evaporação do solvente (d) cromatógrafo a gás.

Primeiramente, foi realizada a extração líquido-líquido, método utilizado para separar componentes específicos de uma mistura heterogênea de líquidos. Utilizou-se o hexano como

solvente para extração dos compostos BTEX das amostras de água, através do funil de separação (Figura 6a). Em seguida, ocorreu o Clean Up, fase em que a amostra de água resultante da extração foi colocada na coluna de florisil, a qual foi umidificada com hexano (Figura 6b). A coluna tem como objetivo reter os compostos de interesse, no caso, os BTEX, atuando como uma esponja seletiva.

Após isso, teve início a fase de concentração, na qual evaporou-se o hexano adicionado como solvente na mistura utilizando-se ar comprimido (Figura 6c). Dessa forma, isolou-se apenas os compostos BTEX da mistura. A última etapa foi o controle da quantidade de solvente já que, mesmo após a evaporação, uma pequena quantidade de solvente ainda fica presente na mistura. Assim, a fim de evitar erros, a quantidade remanescente deve ser a mesma em todas as amostras. Por fim, as amostras foram analisadas em um cromatógrafo a gás, da marca Agilent Technologies, série 7890^a (Figura 6d). O sistema de tratamento de dados foi realizado utilizando o software MSD Productivity ChemStation Data Analysis. As informações sobre a rampa de aquecimento encontram-se descritas a seguir: Temperatura inicial: 45°C (3 minutos); Rampa 1: 8°C/min; Temperatura: 70°C (0 minutos); Rampa 2: 15°C/min; Temperatura final: 290°C (0 minutos); Tempo de corrida: 20,792 minutos; Solvent Delay: 3,6 minutos; Modo: Splitless.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Permeação

As Tabelas 1 e 2 a seguir apresentam os resultados de permeação obtidos para as geomembranas de PEAD e de PVC. A sigla SVT (solvente vapor transmission) foi utilizada quando o cálculo do WVT foi realizado com hidrocarbonetos. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre a permeabilidade média nas cápsulas com geomembranas de PEAD e PVC, intactas, com microfuros, furos e abrasão, preenchidas com água, gasolina e óleo diesel.

Analisando-se os resultados, pode-se observar que, em relação ao líquido utilizado nos experimentos, a gasolina é o que apresenta maior facilidade para atravessar as geomembranas. Isso deve-se ao fato deste ser um líquido mais volátil, apresentando maior facilidade de passar do estado líquido para o gasoso e, conseqüentemente, de atravessar a membrana. Vale ressaltar que, apesar de pequenos, os valores de permeabilidade média da gasolina são muito maiores que os valores obtidos tanto para a água, quanto para o óleo diesel.

Com relação às geomembranas de PEAD, a gasolina possui permeabilidade cerca de dez vezes maior que a água nas geomembranas intactas, com microfuros e abrasão. Já nas geomembranas com furos, esse valor é quase vinte vezes maior. Comparando-se com o óleo diesel, a gasolina possui praticamente o mesmo valor de permeabilidade nas geomembranas intactas. Já nas geomembranas com microfuros e furos, a permeabilidade da gasolina é cerca de dez vezes maior. Essa relação sobe para vinte no caso das geomembranas com abrasão.

Quanto às geomembranas de PVC, o óleo diesel possui permeabilidade, aproximadamente, cinco vezes maior que a água nas intactas e quase igual nas com furos. Já nas geomembranas com microfuros e abrasão, a permeabilidade da água é, respectivamente, o triplo e o dobro da



encontrada para o óleo diesel. Ao se comparar a gasolina com o óleo diesel, nota-se que a permeabilidade da gasolina é vinte vezes maior nas geomembranas intactas e com furos. Nas geomembranas com microfuros, esse valor sobe para cerca de cinquenta vezes e nas com abrasão para cerca de cem vezes mais.

Tabela 1: Resultados do ensaio de permeação em geomembrana de PEAD.

Água				
Tipo	WVT (g/(m ² .dia))	Permeância Média (s ⁻¹)	Permeabilidade Média (cm/s)	
Intacta	0,85	1,00 x 10 ⁻⁰⁹	1,01 x 10 ⁻¹²	
Microfuros	4,57	6,59 x 10 ⁻⁰⁹	6,67 x 10 ⁻¹²	
Danificada	Furos	15,01	8,38 x 10 ⁻⁰⁹	8,49 x 10 ⁻¹²
	Abrasão	3,15	3,76 x 10 ⁻⁰⁹	3,81 x 10 ⁻¹²
Gasolina				
Tipo	SVT (g/(m ² .dia))	Permeância Média (s ⁻¹)	Permeabilidade Média (cm/s)	
Intacta	11,45	1,34 x 10 ⁻⁰⁸	1,36 x 10 ⁻¹¹	
Microfuros	53,54	8,57 x 10 ⁻⁰⁸	8,68 x 10 ⁻¹¹	
Danificada	Furos	219,79	1,65 x 10 ⁻⁰⁷	1,67 x 10 ⁻¹⁰
	Abrasão	18,92	2,22 x 10 ⁻⁰⁸	2,25 x 10 ⁻¹¹
Óleo Diesel				
Tipo	SVT (g/(m ² .dia))	Permeância Média (s ⁻¹)	Permeabilidade Média (cm/s)	
Intacta	5,75	1,36 x 10 ⁻⁰⁸	1,37 x 10 ⁻¹¹	
Microfuros	5,35	1,07 x 10 ⁻⁰⁸	1,08 x 10 ⁻¹¹	
Danificada	Furos	10,02	2,34 x 10 ⁻⁰⁸	2,37 x 10 ⁻¹¹
	Abrasão	0,80	1,61 x 10 ⁻⁰⁹	1,63 x 10 ⁻¹²

Tabela 2: Resultados do ensaio de permeação em geomembrana de PVC.

Água				
Tipo	WVT (g/(m ² .dia))	Permeância Média (s ⁻¹)	Permeabilidade Média (cm/s)	
Intacta	1,33	2,36 x 10 ⁻⁰⁹	2,39 x 10 ⁻¹²	
Microfuros	8,31	1,78 x 10 ⁻⁰⁸	1,81 x 10 ⁻¹¹	
Danificada	Furos	11,94	1,32 x 10 ⁻⁰⁸	1,33 x 10 ⁻¹¹
	Abrasão	4,72	4,34 x 10 ⁻⁰⁹	4,39 x 10 ⁻¹²
Gasolina				
Tipo	SVT (g/(m ² .dia))	Permeância Média (s ⁻¹)	Permeabilidade Média (cm/s)	
Intacta	165,48	1,90 x 10 ⁻⁰⁷	1,93 x 10 ⁻¹⁰	
Microfuros	123,50	1,98 x 10 ⁻⁰⁷	2,01 x 10 ⁻¹⁰	
Danificada	Furos	301,43	3,33 x 10 ⁻⁰⁷	3,37 x 10 ⁻¹⁰
	Abrasão	199,82	1,96 x 10 ⁻⁰⁷	1,99 x 10 ⁻¹⁰
Óleo diesel				
Tipo	SVT (g/(m ² .dia))	Permeância Média	Permeabilidade Média	



			(s ⁻¹)	(cm/s)
Intacta		4,87	1,05 x 10 ⁻⁰⁸	1,06 x 10 ⁻¹¹
	Microfuros	2,83	5,65 x 10 ⁻⁰⁹	5,72 x 10 ⁻¹²
Danificada	Furos	8,03	1,91 x 10 ⁻⁰⁸	1,94 x 10 ⁻¹¹
	Abrasão	1,24	2,84 x 10 ⁻⁰⁹	2,52 x 10 ⁻¹²

Tabela 3: Valores de permeabilidade das geomembranas, em 10⁻¹² cm/s.

		Intacta	Microfuros	Furos	Abrasão
PEAD	Água	1,01	6,67	8,49	3,81
	Gasolina	13,60	86,80	167	22,50
	Óleo diesel	13,70	10,80	23,70	1,63
PVC	Água	2,39	18,10	13,30	4,39
	Gasolina	193	2010	337	199
	Óleo diesel	10,60	5,72	19,40	2,52

Pode-se observar também que os maiores valores de permeabilidade para as cápsulas preenchidas com água e gasolina foram obtidos nas geomembranas com furos, seguida pelas geomembranas com microfuros, abrasão e, por fim, os menores valores nas geomembranas intactas, como esperado. No entanto, para as cápsulas preenchidas com óleo diesel, os maiores valores foram aqueles apresentados pela geomembrana com furos, seguida pelas geomembranas intactas, com microfuros e os menores valores nas geomembranas com abrasão.

Por fim, pode-se dizer que os valores de SVT e WVT, bem como a permeância média, seguem a mesma tendência de ordem, com algumas exceções.

Analisando-se as geomembranas de PEAD, as que apresentam furos possuem WVT cerca de vinte vezes maior que as intactas e três vezes maior que as com microfuros. Já nas geomembranas de PVC, as com furos apresentam valor de WVT dez vezes maior que as intactas e três vezes maior que as com abrasão.

Com relação as cápsulas com gasolina e geomembrana de PEAD, o valor de SVT nas geomembranas com furos foi vinte vezes maior que nas intactas, dez vezes maior que nas com abrasão e cinco vezes maior que nas com microfuros. Já nas cápsulas com óleo diesel e geomembrana de PVC, o valor de SVT nas geomembranas com furos apresentou-se o dobro do valor nas intactas, o triplo nas com microfuros e sete vezes mais que nas com abrasão.

De forma geral, a permeabilidade das geomembranas varia conforme o estado em que se encontram, ou seja, intactas, com microfuros, furos ou abrasão. No pior caso, o valor da permeabilidade aumentou em cerca de cem vezes na geomembrana furada, quando comparada com a intacta, o que alerta para os cuidados que devem ser tomados na fase de instalação das geomembranas nas obras, bem como em sua posterior manutenção, a fim de evitar que a mesma deixe de cumprir sua função. Apesar disso, a ordem de grandeza da permeabilidade manteve-se baixa, o que comprova a eficiência das geomembranas como um material para impermeabilização e confinamento seguro de solos e lençóis freáticos.

4.2 Difusão

A Tabela 4 apresenta as percentagens granulométricas obtidas para os solos estudados. O solo arenoso foi classificado como areia média a fina pouco argilosa marrom avermelhado e o solo argiloso como argila arenosa roxa escura. As Tabelas 5 a 8 apresentam os resultados obtidos por cromatografia gasosa para as concentrações de compostos BTEX.

Tabela 4: Porcentagem da composição granulométrica dos solos.

Composição	Solo arenoso	Solo argiloso
Areia grossa	0,3%	0,0%
Areia média	44,8%	1,5%
Areia fina	35,6%	42,5%
Silte	18,5%	12,0%
Argila	0,8%	44,0%

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que a maior parte das amostras de água não possui quantidade de Benzeno suficiente para ser detectada pelo equipamento de cromatografia gasosa. O mesmo ocorre com o Etilbenzeno e o Xileno, que foram detectados apenas em uma parte das amostras. Apenas o Tolueno pode ser lido em todas as amostras, possibilitando uma análise detalhada de sua concentração ao longo do tempo (vide Figura 7).

Observa-se que, como esperado, a concentração de Tolueno aumentou com o passar dos dias, comprovando a ocorrência do processo difusivo, e culminando na concentração máxima de 0,3087 mg/L, no permeâmetro com solo argiloso contaminado com gasolina e geomembrana furada.

Tabela 5: Concentração de resíduos BTEX (gasolina/solo arenoso).

Data	Dias	Tipo da Geomembrana	Volume (ml)	Benzeno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Xileno (mg/L)
03/03/2017	28	Intacta	9,8	- ¹	-	-	-
		Microfuros	10,1	-	0,0231	-	-
		Furos	10,2	-	0,0213	-	-
		Abrasão	9,7	-	0,0408	-	0,0026
27/03/2017	52	Intacta	10,7	-	-	-	-
		Microfuros	12,0	-	0,0274	-	-
		Furos	6,5	0,0014	0,0302	-	-
		Abrasão	12,0	-	0,0769	-	0,0036
20/04/2017	76	Intacta	10,0	-	-	-	-
		Microfuros	9,8	-	0,0441	0,0008	0,0013
		Furos	11,2	0,0015	0,0556	-	-
		Abrasão	12,0	-	0,1261	0,0009	0,0031
17/05/2017	102	Intacta	10,4	-	-	-	-
		Microfuros	10,7	-	0,0615	0,0011	0,0021
		Furos	9,2	0,0016	0,0814	-	-
		Abrasão	10,2	-	0,1726	0,0018	0,0022
31/05/2017	116	Intacta	10,4	-	-	-	-

Microfuros	11,0	-	0,0743	0,0013	0,0023
Furos	11,0	0,0022	0,0917	-	-
Abrasão	11,0	-	0,1869	0,0019	0,0298

¹: Os valores de concentração estavam abaixo do limite de quantificação (0,0001 mg/L).

Tabela 6: Concentração de resíduos BTEX (gasolina/solo argiloso).

Data	Dias	Tipo da Geomembrana	Volume (ml)	Benzeno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Xileno (mg/L)
26/06/2017	25	Intacta	9,9	-	-	-	-
		Microfuros	10,5	-	0,0891	-	-
		Furos	11,0	-	0,0213	-	-
		Abrasão	10,8	-	0,0110	-	-
21/07/2017	50	Intacta	10,2	-	-	-	-
		Microfuros	10,0	-	0,0994	-	0,0011
		Furos	10,0	-	0,1156	-	0,0023
		Abrasão	10,0	-	0,0199	-	-
16/08/2017	76	Intacta	9,8	-	-	-	-
		Microfuros	11,0	-	0,0008	0,0021	-
		Furos	10,7	-	0,2132	-	0,0031
		Abrasão	11,0	-	0,0236	-	0,0029
09/09/2017	100	Intacta	9,8	-	-	-	-
		Microfuros	9,0	-	0,1465	-	0,0020
		Furos	8,0	0,0011	0,2547	0,0013	0,0038
		Abrasão	10,0	-	0,0304	-	0,0031
25/09/2017	116	Intacta	10,7	-	-	-	-
		Microfuros	10,0	-	0,1966	0,0033	0,0024
		Furos	9,0	0,0013	0,3087	0,0013	0,0498
		Abrasão	9,0	-	0,0429	-	0,0037

Tabela 7: Concentração de resíduos BTEX (óleo diesel/solo arenoso).

Data	Dias	Tipo da Geomembrana	Volume (ml)	Benzeno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Xileno (mg/L)
03/03/2017	28	Intacta	10	-	-	-	-
		Microfuros	9,7	-	0,0315	0,0013	-
		Furos	9,4	-	0,0409	-	-
		Abrasão	9,7	-	0,0588	-	0,0041
27/03/2017	52	Intacta	10,3	-	-	-	-
		Microfuros	11,5	-	0,0385	-	0,0017
		Furos	12,0	0,0012	0,0491	-	0,0022
		Abrasão	12,7	-	0,0596	0,0019	0,0061
20/04/2017	76	Intacta	10,0	-	-	-	-
		Microfuros	9,8	-	0,0443	0,0015	0,0020
		Furos	11,4	0,0013	0,0512	0,0178	0,0031
		Abrasão	8,9	-	0,1287	0,0014	0,0150
17/05/2017	102	Intacta	11,0	-	-	-	-
		Microfuros	8,0	-	0,0474	0,0021	0,0022



		Furos	10,2	0,0014	0,0536	0,0322	0,0039
		Abrasão	10,9	-	0,1980	0,0012	0,0235
		Intacta	10,5	-	-	-	-
31/05/2017	116	Microfuros	10,2	0,0012	0,0491	0,0022	0,0027
		Furos	10,0	0,0019	0,0584	0,0457	0,0412
		Abrasão	10,8	-	0,2237	0,0017	0,0328

Tabela 8: Concentração de resíduos BTEX (óleo diesel/solo argiloso).

Data	Dias	Tipo da Geomembrana	Volume (ml)	Benzeno (mg/L)	Tolueno (mg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Xileno (mg/L)
		Intacta	10,3	-	-	-	-
26/06/2017	25	Microfuros	10,5	-	0,0229	-	-
		Furos	10,3	-	0,0194	-	-
		Abrasão	10,3	-	0,0033	-	0,0010
		Intacta	9,6	-	-	-	-
21/07/2017	50	Microfuros	10,0	-	0,0384	-	-
		Furos	9,0	-	0,0296	-	-
		Abrasão	10,3	-	0,0045	-	0,0019
		Intacta	9,2	-	-	-	-
16/08/2017	76	Microfuros	10,2	0,0013	0,0459	-	0,0069
		Furos	10,3	0,0013	0,0305	-	0,0071
		Abrasão	10,2	-	0,0051	-	0,0228
		Intacta	10,8	-	-	-	-
09/09/2017	100	Microfuros	10,0	0,0013	0,0504	0,0020	0,0069
		Furos	9,0	0,0015	0,0402	0,0010	0,0080
		Abrasão	9,0	-	0,0128	0,0013	0,0263
		Intacta	10,8	-	-	-	-
25/09/2017	116	Microfuros	8,0	0,0015	0,0495	0,0022	0,0092
		Furos	8,0	0,0018	0,0526	0,0032	0,0084
		Abrasão	10,0	-	0,0354	0,0033	0,0302

Para os solos arenosos contaminados com gasolina, o pior cenário foi o da geomembrana com abrasão, seguida pela com furos, microfuros e intacta, respectivamente. As concentrações do Tolueno começaram a subir após 50 dias da montagem do ensaio. Para os solos argilosos contaminados com gasolina, as mais altas concentrações de Tolueno foram obtidas no permeâmetro que possuía a geomembrana com furos. A concentração foi mais reduzida no caso da geomembrana com microfuros, mais ainda na com abrasão e quase nula na geomembrana intacta. Vale ressaltar que no permeâmetro em que a geomembrana tinha microfuros, a concentração não seguiu o padrão usual de crescimento, o que pode ser justificado por possíveis vazamentos ou evaporação.

Para as contaminações com óleo diesel no solo arenoso, as concentrações mais altas foram lidas nas amostras do permeâmetro com geomembrana com abrasão. As concentrações nas geomembranas com furos e microfuros mantiveram-se praticamente constantes ao longo do tempo de ensaio. Por fim, com o solo argiloso contaminado com óleo diesel, ao final dos 116 dias, a maior concentração de Tolueno foi obtida com a geomembrana com furos, que foi praticamente igual



àquela obtida nas amostras onde a geomembrana possuía microfuros. Nas geomembranas com abrasão, a concentração foi um pouco menor e, por último, na intacta, a concentração foi praticamente nula.

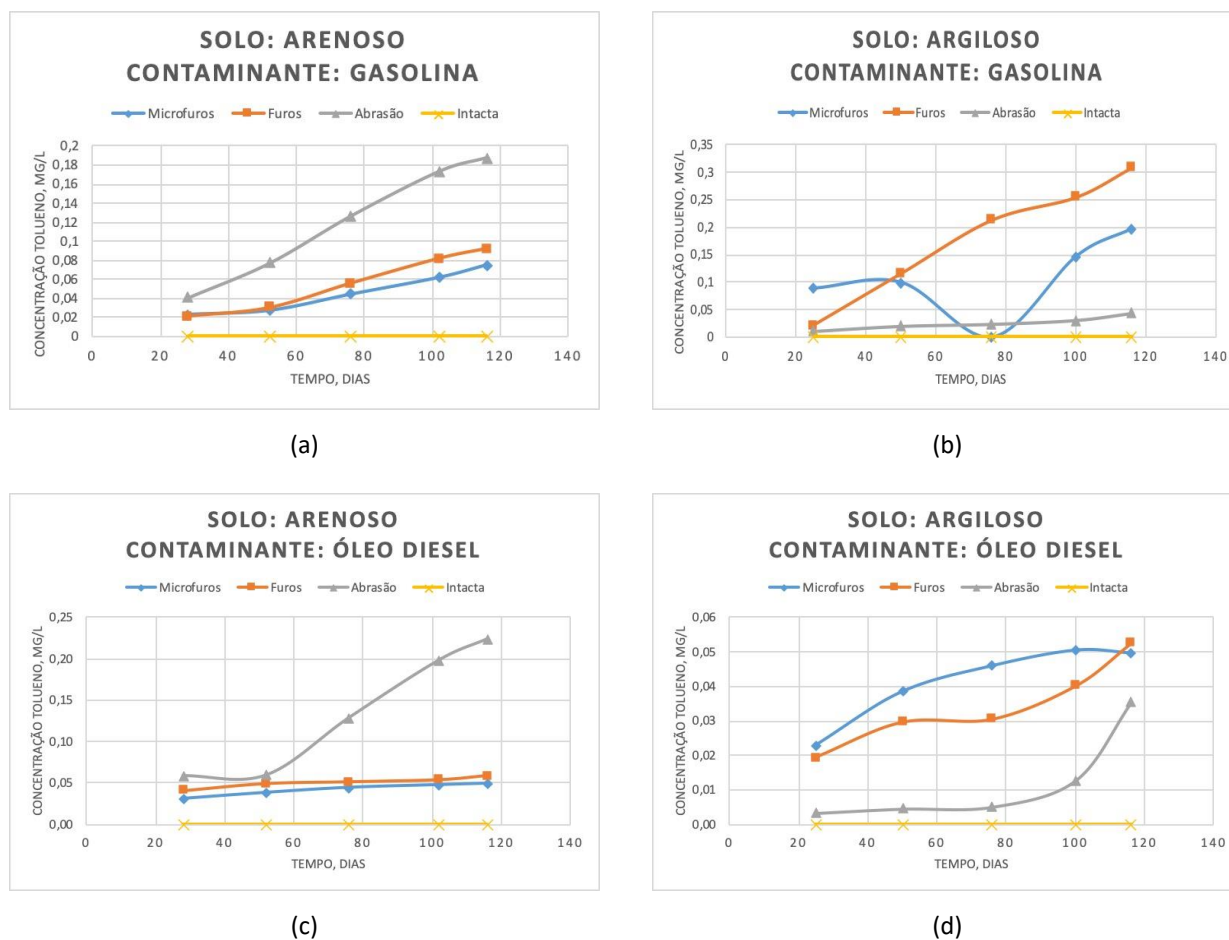


Figura 7: Variação da concentração do tolueno (a) solo arenoso com gasolina (b) solo argiloso com gasolina (c) solo arenoso com óleo diesel (d) solo argiloso com óleo diesel.

Em todos os casos, tanto para solos arenosos, quanto para argilosos, contaminados com gasolina ou óleo diesel, com as geomembranas intactas, até os 116 dias analisados, não foi possível detectar nenhum dos compostos BTEX, validando seu uso como barreira impermeabilizante.

De forma geral, a cromatografia gasosa mostrou-se eficaz na avaliação da contaminação do BTEX. Entretanto, em muitos casos, não se detectou com exatidão a concentração, por esta ser menor do que a mínima lida pelo equipamento e também pelo fato de estar muito próxima ao valor de zero. Apesar disso, pode-se afirmar que as concentrações são muito menores do que as máximas estabelecidas por lei (Portarias Nº 518, de 25 de março de 2004, e Nº 2914, de 12 de dezembro de 2011) e, portanto, a água pode ser considerada potável.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão de acordo com resultados obtidos por Valentin. (2008) e Marçal (2012). Infelizmente, a literatura técnica não apresenta outros resultados semelhantes para fins de comparação.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, as principais conclusões podem ser elencadas:

- Os hidrocarbonetos exercem uma influência maior que a água na permeabilidade das geomembranas;
- O líquido que mais influencia a permeabilidade das geomembranas intactas é a gasolina, sendo sua influência maior na GM de PVC (quase 15 vezes maior que o valor obtido para o PEAD);
- Os microfuros e furos exercem influência maior do que o processo de abrasão nos valores de permeabilidade para ambas as GMs. No entanto, os furos exercem uma influência muito mais significativa. Em relação ao tipo de GM, as de PVC são muito mais afetadas do que as GM de PEAD;
- A técnica de cromatografia gasosa mostrou-se eficaz na análise da concentração de compostos BTEX nas amostras analisadas;
- Em todos os casos, tanto para solos arenosos, quanto para argilosos, contaminados com gasolina ou óleo diesel, com as GMs de PEAD intactas, até os 116 dias analisados, não se detectou nenhum dos compostos BTEX;
- No processo de contaminação com a gasolina, verifica-se que esta influencia de forma mais significativa o solo arenoso do que o solo argiloso. Nesse sentido, a influência dos furos foi mais significativa para o solo arenoso;
- Analisando-se a influência do óleo diesel como contaminante, nota-se que este exerce maior influência sobre o solo arenoso do que o argiloso. Além disso, para o solo arenoso, os furos exercem uma contribuição maior. No entanto, para o solo argiloso, os microfuros também aparecem com uma parcela de contribuição;
- De forma geral, no processo de contaminação, o tolueno foi o resíduo detectado em maior concentração para os dois tipos de solos e hidrocarbonetos analisados.



6 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1995). D4439: Standard Terminology for Geosynthetics. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1995). D5747: Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1999). D4545 – 86: Standard Practice for Determining the Integrity of Factory Seams Used in Joining Manufactured Flexible Sheet Geomembranes. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1999). D4437: Standard Practice for Determining the Integrity of Field seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1992). D5322: Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids. West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2000). E96: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. West Conshohocken.
- ANJOS, R. B. Avaliação de HPA e BTEX no solo e água subterrânea, em postos de revenda de combustíveis: estudo de caso na cidade de Natal – RN. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo, Centro de Tecnologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2003). NBR 12553: Geossintéticos – Terminologia.
- COSTA, A. H. R.; NUNES, C. C.; CORSEUIL, H. X. (2009). Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com uso de nitrato. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 2, p. 265-274.
- KAIPPER, B. I. A. (2003). Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos aromáticos em aquíferos contaminados por óleo diesel. Tese de Doutorado em Química Analítica, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- LODI, P. C. (2003). Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila) (PVC). Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MARÇAL, R. (2012). Avaliação da permeabilidade em geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD). Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira.



- NOSKO, V., ANDREZAL, T., GREGOR, T. e GANIER, P. (1996). Sensor Damage Protection Damage Detection System (DDS) – The unique geomembrane test method. Proceedings of Geosynthetics'96, Maastricht, Netherlands, p.743-748.
- NOSKO, V. e TOUZE-FOLTZ, N. (2000). Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer. Proceedings of Geosynthetics 2000, Bologna, Italia, v. 2, p. 557-560.
- PEGGS, I. D. (2001). Three challenging electrical integrity/leak surveys on uncovered and deep water-covered liners. Proceedings of Geosynthetics 2001, Portland, USA, v. 1, p.245-262.
- Portaria MS nº 518 (25, março, 2004). Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília-DF, 26 de mar. de 2004.
- Portaria MS nº 2.914 (12, dezembro, 2011). Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília-DF, 14 de dez. de 2011.
- ROLLIN, A. L.; RIGO, J. M. (1991). Geomembranes: Identification and Performance Testing. Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes. RILEM, Rollin A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain, 376 p.
- ROLLIN, A.L. MARCOTTE, M. e CHAPUT, L. (1999). Leak location in exposed geomembranes liners using an electrical leak detection technique. Proceedings of Geosynthetics' 99, Boston, Massachusetts, v. 2, p. 615-626.
- VALENTIN, C. A. (2008). Estudo da degradação de geomembrana de polietileno de alta densidade de 2,5 mm de espessura frente à gasolina, óleo diesel e álcool combustível. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Mello, J. B., Lavoie, F. L., & Lodi, P. C. (2021). Avaliação da influência de danos na permeação e difusão de geomembranas poliméricas. *Holos*. 37(8), 1-19.

SOBRE OS AUTORES,

J. B. MELLO

Aluna de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP). E-mail: julia_bmello@hotmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4627-5064>

F. L. LAVOIE

Mestre em Geotecnia com ênfase em Geossintéticos - Professor do curso de Engenharia Civil do Instituto Mauá de Tecnologia (SP). E-mail: fernando.lavoie@maua.br
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1242-3708>



P. C. LODI

Professor Associado - Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Área de Geotecnia. E-mail: paulo.lodi@unesp.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8857-1710>

Editor(a) Responsável: Francinaide Nascimento

Pareceristas *Ad Hoc*: Paulo Filipe Lopes

