

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

RAFAEL MARÇAL

AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM GEOMEMBRANAS DE  
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

Ilha Solteira

2012

RAFAEL MARÇAL

AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM GEOMEMBRANAS DE  
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira,  
para obtenção do título de Mestre Em Engenharia  
Civil.

Área de Conhecimento: Recursos Hídricos e  
Tecnologias Ambientais

**Orientador:** Prof. Dr. Paulo César Lodi

Ilha Solteira - SP

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação

- M299a      Marçal, Rafael.  
Avaliação da permeabilidade em geomembranas de polietileno de alta densidade (pead) / Rafael Marçal. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2012  
82 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2012
- Orientador: Paulo César Lodi  
Inclui bibliografia
1. Permeabilidade. 2. Difusão. 3. Geomembranas.

**unesp**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

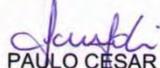
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

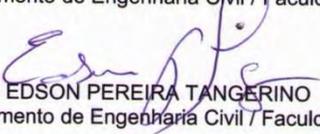
**TÍTULO:** Avaliação da permeação em geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD)

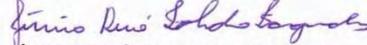
**AUTOR:** RAFAEL MARÇAL

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. PAULO CESAR LODI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. PAULO CESAR LODI  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru

  
Prof. Dr. EDSON PEREIRA TANGERINO  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JÚNIO RENÉ TOLEDO FAGUNDES  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 10 de julho de 2012.

*Aos meus exemplos de vida,  
meus apoios incondicionais,  
meus pais Magali e Melquior.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – PPGEC pela oportunidade de aprofundar meus estudos.

Agradeço também ao meu orientador Paulo César Lodi, que nos momentos de dúvidas sempre soube me orientar.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa, CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira – DEC, em especial aos docentes da área de Geotecnia.

À todos amigos do departamento de engenharia civil e aqueles que fazem parte de nosso convívio diário.

Ao Laboratório de Engenharia Civil que forneceu condições para que pudesse ser realizada minha pesquisa, bem como pessoal capacitado e dotado de vontade para auxiliar.

Aos técnicos do laboratório de engenharia civil, em especial: Gilson Campus Correa; José Cavassano Ribeiro e Mário Roberto Correa Ferreira.

À infra-estrutura oferecida pelo campus da faculdade de engenharia de Ilha Solteira, aos funcionários e a biblioteca que disponibiliza informação, apoiando as atividades de ensino, pesquisa e extensão.

Aos amigos de pesquisa dos geossintéticos, Thaís Leal Leite, Daliana Possari, Guilherme Iberê e Bianca Munhoz.

Ao meu irmão e amigo, Régis Marçal, pelo apoio e ajuda na pesquisa.

Por fim, agradeço aos meus pais pelos anos de sacrifício despendidos com a minha formação e educação e por todo amor que nunca me faltou. Por sempre confiarem no sucesso e por todos os momentos que me convenceram de que eu me sairia bem. A eles devo muito mais do que um simples obrigado, pois por causa deles posso lutar pelos meus objetivos. Em especial, agradeço à minha mãe, Magali de Sousa Marçal, que sempre me deu condições e muitos conselhos para que eu pudesse atingir meus objetivos.

*“O conhecimento torna a alma jovem e diminui a amargura da velhice.*

*Colhe, pois, a sabedoria.*

*Armazena suavidade para o amanhã”.*

*Leonardo da Vinci*

## RESUMO

---

As geomembranas são materiais poliméricos que possuem reduzida condutividade hidráulica e sua função principal é a de impermeabilizar e desviar o fluxo de líquidos ou gases. A eficiência das geomembranas como barreiras para controle e desvio de fluxo está diretamente relacionada com a integridade da sua superfície. Dessa maneira, suas propriedades de permeação são extremamente importantes não somente em aterros, mas em obras hidráulicas, de contenção ou que necessitem garantir a estanqueidade. O estudo e a compreensão desses parâmetros possibilitam aos projetistas a compreensão dos fenômenos de infiltração, fugas, vazamentos e transporte difusivo que por ventura possam ocorrer em campo. Dessa forma, esse trabalho apresenta um estudo sobre os parâmetros de permeação e difusão de geomembranas em laboratório para análise e entendimento dessas propriedades em materiais intactos, expostos à radiação ultravioleta e aos efeitos da temperatura em estufa e que apresentem defeitos como micro furos (furos com dimensão menor que a espessura da geomembrana) e furos que possam facilitar o aumento do fluxo, além da avaliação da permeabilidade e processo difusivo aos hidrocarbonetos. Foram realizados diversos ensaios empregando-se um procedimento muito utilizado em geomembranas para determinação da permeabilidade em laboratório, que é a Razão de Transmissão de Vapor d'Água. Diante dos resultados, nota-se, por exemplo, que dentre os processos de degradação, a influência dos danos nas geomembranas é mais significativa do que o próprio efeito da exposição à intempérie provocada no decorrer do tempo, haja vista que um furo de 3,0 mm foi mais significativo no aumento do valor da permeabilidade do que o envelhecimento aos raios UV por 12 anos. O método utilizado na avaliação do processo difusivo foi eficaz para detectar os compostos que difundiram pela geomembrana em função do tempo.

**Palavras-chave:** Permeabilidade. Difusão. Geomembranas.

## **ABSTRACT**

---

Geomembranes are polymeric materials that have low hydraulic conductivity and its main function is to insulate and divert the flow of liquids or gases. The efficiency of geomembranes as barriers to control and diversion of flow is directly related to the integrity of its surface. Thus, their permeation properties are extremely important not only in landfills, but in hydraulic works, containment, or who need to ensure tightness. The study and understanding of these parameters allow designers to understand the effects of infiltration, leaks, spills, and diffusive transport that might occur by chance in the field. Thus, this paper presents a study on the parameters of permeation and diffusion of geomembranes in the laboratory for analysis and understanding of these properties in intact materials exposed to ultraviolet radiation and effects of temperature in the greenhouse and they have defects such as micro holes (holes dimension less than the thickness of the geomembrane) and holes which can facilitate flow increases, besides the evaluation of permeability and diffusion process for hydrocarbons. Several trials were conducted employing a procedure commonly used in geomembranes to determine the permeability in the laboratory, which is the ratio of Water Vapor Transmission. The results showed, for instance, that among the degradation processes, the influence of damage on geomembranes is more significant than the actual effect of exposure to atmospheric conditions caused over time, given that a hole of 3.0 mm was more significant increase in the permeability value than the UV aging for 12 years. The method used to evaluate the diffusive process was effective to detect compounds that passed through the geomembrane against time.

**Keywords:** Permeability. Diffusion. Geomembranes

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 3.1</b>	Exemplos de aplicações de geomembranas .....	22
<b>Figura 3.2</b>	Processo construtivo em obra envolvendo geomembranas .....	26
<b>Figura 3.3</b>	Causa de danos em geomembranas.....	26
<b>Figura 3.4</b>	Causas de danos em geomembranas após a cobertura da camada granular e sem cobertura .....	27
<b>Figura 3.5</b>	Localização de danos em geomembranas em aterros sanitários.....	28
<b>Figura 3.6</b>	Separação por interações analito-fase estacionária.....	39
<b>Figura 3.7</b>	Esquema das partes básicas de um cromatógrafo a gás simples.....	40
<b>Figura 4.1</b>	Geomembranas utilizadas na pesquisa.....	44
<b>Figura 4.2</b>	Em (a), equipamento utilizado para determinação das espessuras das geomembranas e em (b), balança utilizada para determinação da densidade em geomembranas .....	46
<b>Figura 4.3</b>	Prensa mecânica utilizada nos ensaios de caracterização mecânica .....	47
<b>Figura 4.4</b>	Detalhes do recipiente de alumínio de diâmetro interno médio de 75 mm utilizado no ensaio de permeabilidade .....	48
<b>Figura 4.5</b>	Geomembrana circular com furos na extremidade ao lado do recipiente metálico .....	48
<b>Figura 4.6</b>	Vista lateral e vista superior do conjunto.....	49
<b>Figura 4.7</b>	Detalhe das geomembranas expostas à intempérie .....	50
<b>Figura 4.8</b>	Geomembranas expostas em estufa .....	50

<b>Figura 4.9</b>	Detalhe do permeâmetro .....	51
<b>Figura 4.10</b>	Vista superior e lateral do conjunto .....	52
<b>Figura 4.11</b>	Recipiente montado e preparado para o ensaio.....	53
<b>Figura 5.1</b>	Resultados obtidos por meio do ensaio de tração em geomembranas de PEAD de espessura de 1,0mm .....	56
<b>Figura 5.2</b>	Resultados obtidos para as amostras virgens .....	58
<b>Figura 5.3</b>	Resultados obtidos para as amostras degradadas pelos raios UV .....	59
<b>Figura 5.4</b>	Comparação dos valores obtidos em função do tipo de exposição para amostras sem furos .....	60
<b>Figura 5.5</b>	Comparação dos valores do coeficiente de permeabilidade .....	61
<b>Figura 5.6</b>	Variação de WVT pela área defeituosa .....	63
<b>Figura 5.7</b>	Variação de permeância pela área defeituosa .....	64
<b>Figura 5.8</b>	Variação de permeabilidade pela área defeituosa.....	65
<b>Figura 5.9</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com álcool .....	67
<b>Figura 5.10</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com gasolina.....	68
<b>Figura 5.11</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com óleo diesel .....	69
<b>Figura 5.12</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para os ensaios com álcool, gasolina e óleo diesel.....	70
<b>Figura 5.13</b>	Curvas da concentração de cada composto presente na água pela análise da difusão .....	72

## LISTA DE TABELAS

---

<b>Tabela 3.1</b>	Principais ensaios utilizados em geomembranas .....	21
<b>Tabela 3.2</b>	Qualidade da superfície subjacente à geomembrana .....	29
<b>Tabela 3.3</b>	Dimensões de danos em função do tipo de dano .....	30
<b>Tabela 3.4</b>	Formulações recomendadas para cálculo de permeabilidade através de geomembranas .....	38
<b>Tabela 4.1</b>	Ensaio realizado para caracterização das geomembranas.....	45
<b>Tabela 5.1</b>	Ensaio realizado para caracterização das geomembranas.....	55
<b>Tabela 5.2</b>	Características físicas das amostras utilizadas.....	55
<b>Tabela 5.3</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade à água para cada tipo de amostra .....	57
<b>Tabela 5.4</b>	Análise comparativa para os processos de envelhecimento da geomembrana.....	61
<b>Tabela 5.5</b>	Resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade de vapor d'água.....	63
<b>Tabela 5.6</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com álcool .....	66
<b>Tabela 5.7</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com gasolina.....	67
<b>Tabela 5.8</b>	Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com óleo diesel.....	68
<b>Tabela 5.9</b>	Compostos e concentrações encontradas no solo contaminado com óleo diesel .....	71
<b>Tabela 5.10</b>	Compostos e concentrações encontradas em cada período de análise.....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$M$	Massa
$A$	Área
$t$	Período de tempo
$\omega$	Permeança
$\psi$	Permissividade
$P$	Pressão de Vapor
$P_s$	Pressão de Vapor Saturado
$H$	Umidade Relativa
$T$	Espessura da Geomembrana
$K$	Permeabilidade
$\rho$	Densidade
$g$	Aceleração da Gravidade
$h_w$	Profundidade do líquido acima da geomembrana
$d$	Diâmetro do Microfuro
$\eta$	Viscosidade Dinâmica do Líquido
$T_g$	Espessura da geomembrana
$Q$	Fluxo Através do Furo
$C_B$	Coefficiente Relacionado à Forma das Bordas da Abertura
$a$	Área do Furo
$\lambda$	Comprimento de Onda

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEN	Comitê Europeu de Normatização
CQA	Garantia da Qualidade da Construção
CQC	Controle de Qualidade da Produção
CSPE	Polietileno Clorossulfonado
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
GCL	Geosynthetic Clay Liner ( Geocomposto Argiloso – Bentonítico)
GM	Geomembrana
GMR	Geomembrana Reforçada
GMT	Geomembrana Texturizada
HPA	Hidrocarbonetos Poli Aromáticos
ISO	International Organization for Standardization
LLDPE	Polietileno Linear de Baixa Densidade
NBR	Norma Brasileira Registrada
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PE	Polietileno
PELMD	Polietileno Linear de Média Densidade
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila
UNI	Nazionale Italiano di Unificazione
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta
WVT	<i>Water Vapor Transmition</i>

# SUMÁRIO

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	Generalidades .....	16
1.2	Justificativa.....	17
1.3	Organização do Trabalho .....	18
<b>2.</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>19</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
3.1	Geomembranas .....	20
3.2	Danos Mecânicos .....	25
3.3	Proteção Contra Danos Mecânicos .....	29
3.4	Degradação Ultravioleta.....	31
3.5	Ensaio de Permeabilidade.....	33
3.6	Ensaio de Cromatografia .....	39
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
4.1	Introdução.....	43
4.2	Geomembrana .....	44
4.2.1	Ensaio de Caracterização das Propriedades Físicas .....	45

4.2.2	Ensaio de Caracterização das Propriedades Mecânicas.....	46
4.3	Ensaio de permeabilidade.....	47
4.4	Ensaio de Difusão.....	50
4.4	Cromatografia Gasosa.....	53
4.4.1	Ensaio de Recuperação.....	54
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>55</b>
5.1	Ensaio de caracterização das propriedades físicas.....	55
5.2	Ensaio de caracterização das propriedades mecânicas.....	55
5.3	Avaliação da permeabilidade em geomembranas de pead intactas e com imperfeições após diferentes processos de degradação.....	57
5.4	Influência de defeitos (furos e microfuros) na permeabilidade de geomembranas de PEAD.....	63
5.5	Análise da permeabilidade em geomembranas de PEAD aos hidrocarbonetos.....	66
5.6	Difusão.....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 GENERALIDADES

A utilização de materiais geossintéticos no Brasil é relativamente recente. As primeiras aplicações tiveram início na década de 90 e, basicamente, tem-se notado um grande crescimento da indústria no contexto nacional. Para tanto, é necessário que se compreendam o comportamento e as diversas formas de interação desses materiais nas suas aplicações.

Em face ao crescente emprego dos geossintéticos em projetos de contenção, armazenamento, proteção, obras hidráulicas e principalmente em obras ambientais cuja finalidade é o desvio de fluxo, seja de gases ou de líquidos gerados, os aspectos de permeabilidade das geomembranas em obras geotécnicas constituem um tema de trabalho importante e extremamente necessário.

Nesse contexto, os dados existentes são na maioria restritos a ensaios de laboratório e/ou simulações numéricas. Isso porque as obras em geral apresentam-se relativamente novas. Os ensaios de laboratório procuram simular as condições reais das obras em escalas menores. Em diversos casos, os resultados são apenas de caráter qualitativo devido aos diversos fatores que podem influenciar as geomembranas em obras.

A análise dos processos de permeabilidade dos materiais poliméricos, em particular, das geomembranas, envolve uma série de questões que ultrapassam a fronteira do conhecimento do engenheiro geotécnico. No entanto, é dele a responsabilidade de especificar e projetar as obras que se apóiam integralmente no desempenho satisfatório de um material geossintético. Neste contexto, cabe ao engenheiro geotécnico a previsão da longevidade das obras e, em consequência, a quantificação dos danos causados aos geossintéticos em obra, seja por ciclos de umedecimento e secagem, de exposição à intempérie (raios ultravioletas), de contato com meios de pH diferentes, defeitos de fabricação (furos ou microfuros) e surgimento de fissuras. Some-se a isto, os efeitos de longa duração das tensões de confinamento e de esforços de tração diferentes a que estes materiais podem estar sujeitos. Tudo isto pode ocorrer em uma ampla variedade de combinações entre os vários efeitos que originam respostas particulares. O engenheiro deve então estar ciente e tomar decisões diante destas condições de exposição às quais os geossintéticos estarão submetidos nas diversas obras em que são empregados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Pelo fato das geomembranas serem utilizadas para controle de fluxo e para garantir a estanqueidade das obras em geral, as propriedades de permeabilidade tem função primordial. Assim, o estudo e a compreensão desses parâmetros frente às diversas situações que podem ocorrer em campo, principalmente quando há a necessidade de se garantir que não ocorram fugas ou vazamentos, é de extrema importância. Não obstante, bastaria salientar que numa simples aplicação de uma geomembrana para contenção de líquidos percolados em aterros, por exemplo, a despeito de todos os demais componentes do sistema, se a geomembrana apresentar vazamentos, fugas ou pequenas imperfeições que aumentem o fluxo através dela, então a obra como um todo perde sua função. Em termos simples, se há o comprometimento das funções de permeabilidade da geomembrana para a qual esta foi projetada, ocorre a falência do projeto.

Não obstante, a impermeabilização de locais de disposição de resíduos, armazenamento de combustíveis e de substâncias perigosas, impermeabilização de lagoas de tratamento e impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento são exemplos de aplicações onde os atributos da camada impermeável são claros e devem ser norteadores dos projetos na utilização de materiais alternativos.

Tendo em vista que durante o processo de instalação, a pequena espessura da geomembrana, associada aos materiais protuberantes com os quais ela pode estar em contato, tráfego de equipamentos, processos de instalação, queda de ferramentas, entre outros, torna as geomembranas suscetíveis à ocorrência de danos mecânicos. Dessa forma, os parâmetros de permeabilidade podem ser afetados comprometendo a função principal da geomembrana na obra como um todo.

Como exposto, os aspectos de permeabilidade das geomembranas em obras geotécnicas são extremamente relevantes em diversos projetos, mas principalmente em obras hidráulicas e ambientais ou de armazenamento de combustíveis.

Objetivando entender melhor o comportamento e as propriedades das geomembranas poliméricas, em particular a geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), foram realizados ensaios para avaliação das propriedades de permeabilidade e de difusão destas.

Nesse sentido, esse trabalho apresenta um estudo sobre os parâmetros de permeabilidade de geomembranas em laboratório para análise e compreensão dessas

propriedades em materiais intactos (sem algum tipo de dano), expostos à radiação ultravioleta por 12 anos e que apresentem defeitos como micro furo (furos com dimensão menor que a espessura), furos que possam facilitar o aumento do fluxo, além da análise da permeabilidade aos hidrocarbonetos. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma ASTM E96 que emprega um método indireto para determinação da permeância e posteriormente do coeficiente de permeabilidade de membranas de baixíssima permeabilidade. Como complementação, foi verificado o processo difusivo da geomembrana a hidrocarbonetos conforme método proposto por Valentin (2008).

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está organizado como segue:

O capítulo 2 apresenta o objetivo do trabalho.

O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica enfocando os conceitos e principais pesquisas acerca do assunto.

O capítulo 4 aborda os materiais e métodos utilizados na pesquisa, referenciando as principais normas utilizadas.

O capítulo 5 contém os resultados representados na forma de gráficos e tabelas e análises da pesquisa.

O capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo

O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas

## **2. OBJETIVO**

---

Avaliação em laboratório dos parâmetros de permeabilidade de geomembranas de PEAD em condições intactas, degradadas e com imperfeições e avaliação do processo difusivo a hidrocarbonetos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 3.1 GEOMEMBRANAS

Segundo a definição da *INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY*, geomembranas são mantas contínuas e flexíveis constituídas de um ou mais materiais sintéticos. Elas possuem baixíssima permeabilidade e são usadas como barreiras para fluidos, gases ou vapores (BATHURST, 2007).

A ASTM ISSO 10318 chama a geomembrana de “barreira geossintética polimérica” e a define como uma estrutura plana manufaturada feita de materiais geossintéticos que servem como um revestimento impermeável. O efeito impermeável é atingido principalmente pelos polímeros. São usadas em aplicações geotécnicas e em construções em contato direto com o solo e/ou outros materiais.

Os principais tipos de geomembranas existentes e utilizados como barreiras de desvio e controle de fluxo são as de PEAD (polietileno de alta densidade), PELMD (polietileno linear de média densidade), LLDPE (polietileno linear de baixa densidade), PP (polipropileno), CSPE (polietileno clorossulfonado) e PVC (policloreto de vinila).

Estes elementos, em muitos casos, são denominados como barreiras impermeáveis. No entanto, através de ensaios de permeabilidade de vapor d’água em laboratórios, verificou-se que estes materiais apresentam valores típicos de permeabilidade compreendidos entre  $1 \times 10^{-10}$  e  $1 \times 10^{-13}$  cm/s (GEROTO, 2008).

Atualmente, os materiais mais empregados para a fabricação de geomembrana para aplicação em obras hidráulicas são policloreto de vinila, PVC, polipropileno, PP, polietileno de alta densidade, PEAD, e o polietileno linear de baixa densidade, LLDPE (COLMANETTI, 2006).

Os principais ensaios existentes relacionados as geomembranas compreendem ensaios de para estudo da durabilidade, ensaios de caracterização e ensaios de desempenho. Todos estes ensaios são normatizados e seguem as recomendações e prescrições das referidas normas, seja pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), pela ISO (International Organization for Standardization), pela ASTM (American Society for Testing and Materials), pela UNI (Nazionale Italiano di Unificazione) ou pelo CEN (Comitê Europeu de Normatização).

A tabela a seguir representa os principais ensaios utilizados em geomembranas e suas respectivas normas a serem seguidas.

Tabela 3.1 – Principais ensaios utilizados em geomembranas.

<b>PRINCIPAIS ENSAIOS UTILIZADOS EM GEOMEMBRANAS</b>	
<b>Tipos de Ensaios</b>	<b>Principais Normas Utilizadas</b>
<b>1. Ensaios Para Estudo de Durabilidade</b>	ISO 11343 ( ISO, 1997); ISO 2578 (ISO, 1993); ISO 188 (ISO,1998)
<b>2. Ensaios de Caracterização</b>	
2.1 Gramatura	NBR 12568 (ABNT,2000); EN965 (CEN, 1997)
2.2 Espessura Nominal	ASTM D 5199 (ASTM, 2001); UNI 8202/6 (UNI, 1989)
2.3 Dureza Shore A	ISO 868 (ISO, 1985); UNI 4916 ( UNI, 1974)
2.4 Densidade ou Massa Específica	ASTM D 792 (1979)
2.5 Resistência a Tração Uniaxial	ASTM D 668 (ASTM, 1991); ASTM D 6693
2.6 Análise Termogravimétrica (TGA)	ISO 11358 (ISO, 1997)
2.7 Extração de Plastificantes	ISO 6427 (ISO, 1992)
2.8 Flexibilidade em Baixas Temperaturas	UNI 8202/15 (UNI, 1984)
2.9 Resistência ao Rasgo	ISO 34-1 (ISO, 1994)
2.10 Estabilidade Dimensional ao Calor	prEN 1107-2 (CEN, 2000)
2.11 Resistência ao Puncionamento Estático - Método de Penetração (CBR)	EN ISO 12236 CEN (1996)
2.12 Resistência ao Puncionamento Dinâmico	UNI 8202/12 (UNI, 1988)
2.13 Razão de Transmissão de Vapor D'Água	ASTM E96
2.14 Resistência a Tração Uniaxial em diferentes temperaturas	ASTM D638 (ASTM,1991)
<b>3. Ensaios de Desempenho</b>	
3.1 Resistência ao Estouro ( " Bursting Test")	prEN 14151 (CEN,2001)
3.2 Ensaio de Cisalhamento entre Interfaces	prEN ISO 12957-1 (CEN, 2000)

Giroud e Touze-Foltz (2003), apontam que as geomembranas mais usadas no fundo de aterros sanitários são as de PEAD. A preferência por este tipo de geomembrana se deve especialmente à maior experiência adquirida na aplicação desses materiais e à sua resistência química. Zanzinger e Gartung (2002) comentam que apesar do sistema de certificação da Alemanha permitir o uso de geomembranas compostas de outros polímeros, os 20 anos de experiência no uso de geomembranas de PEAD de obras de engenharia civil justificam a preferência por esse material. Engenheiros e pesquisadores reconhecem que a utilização de geomembranas que não são manufaturadas de PEAD no fundo de aterros sanitários só será recorrente quando estiver provado que outros tipos de geomembranas apresentam as propriedades requeridas para um bom desempenho (TOUZE-FOLTZ et al, 2008).

As geomembranas podem ser aplicadas em aterros sanitários, canais, lagoas de tratamento de efluentes, contenção de substâncias perigosas entre outras. A Figura 3.1 apresenta algumas aplicações de geomembranas em obras de engenharia.

Figura 3.1 - Exemplos de aplicações de geomembranas.



(a) Aterros sanitários



(b) Canais



(c) Lagoas de tratamento



(d) Impermeabilização



(e) Lagos ornamentais



(f) biodigestores de gás

Fonte: Geroto (2008).

Alguns danos causados às geomembranas podem comprometer sua função na obra. O revestimento de fundo em aterros sanitários modernos inclui um sistema de coleta de chorume que tem como função controlar a carga hidráulica atuante sobre a barreira impermeável e coletar e remover o líquido (BOUAZZA et al., 2002). Esse sistema de coleta geralmente é composto por um filtro geotêxtil, uma camada granular ou uma georrede, atuando como lençol drenante e geotubos (tubos perfurados para coleta do chorume). A camada granular associada à pequena espessura da geomembrana e altas pressões confinantes esperadas em aterros sanitários, resultaria no puncionamento desta última, resultando no vazamento de líquidos através da barreira. Outros problemas também podem comprometer a estanqueidade das geomembranas, como as falhas em soldas entre painéis e em encontros com outras estruturas.

Mesmo em obras onde são empregados o controle de qualidade da construção (CQC) e a garantia da qualidade da construção (CQA), as geomembranas estão sujeitas a estes danos mecânicos (BOUAZZA et al., 2002), que podem prejudicar seu desempenho como barreira.

O controle de qualidade da instalação de geossintéticos tem evoluído sensivelmente nos últimos anos. Há normalização internacional para armazenamento na indústria, transporte, recebimento, armazenamento na obra, determinação de propriedades e instalação. No Brasil, muitos ensaios de propriedades índices e de desempenho, têm sido normalizados pela ABNT. Emendas que eram uma importante causa de defeito há dez anos, podem atualmente ser executadas e testadas na hora. Há problemas de

instalação e operação que persistem como furos associados a dobras e pregas, ancoragem, estabilidade dimensional, resistência ao cisalhamento, entre outros que são pesquisados e debatidos no meio técnico.

A correta especificação do produto a ser empregado é fundamental para o sucesso da obra: as propriedades requeridas em projeto devem corresponder às solicitações admissíveis dos geossintéticos, considerando-se os fatores de redução e de segurança parcial inerentes à aplicação.

Bueno (2003) sugere um modelo de especificação para geossintéticos dividido em quatro grupos: índices de identificação ou de classificação do geossintético, propriedades dominantes e essenciais que alicerçam os critérios de projeto, propriedades que estabelecem o desempenho do geossintético durante o período construtivo e propriedades que garantam durabilidade do geossintético como proteção de toda a vida útil da obra. Os geossintéticos devem, portanto, serem ensaiados em diversas fases, para a garantia de qualidade do produto produzido, da conformidade entre o material especificado e o entregue em obra e da qualidade do material instalado.

O desempenho das geomembranas depende em grande parte da qualidade da instalação. Segundo Vidal (1998), entretanto, o item mais importante para a eficiência de uma obra impermeabilizada com geomembranas é fase do projeto, em que todas as condições críticas do ponto de vista geotécnico, hidráulico, estrutural e também do produto devem ser analisados.

As geomembranas são atualmente sujeitas a danos por punção e por acúmulo de tensões; daí a necessidade de se cobrir a geomembrana com uma camada de proteção e controlar os procedimentos de campo para evitar o tráfego de pessoal e de equipamentos à geomembrana descoberta.

Além disso, as geomembranas não estão sujeitas apenas a ocorrência de danos mecânicos, mas também à influência de elevadas temperaturas e dos efeitos da intempérie, tais como a exposição aos raios ultravioletas, que podem afetar os parâmetros de permeabilidade para qual a geomembrana foi projetada, já que exposição das geomembranas aos efeitos da intempérie pode provocar alterações nas propriedades de permeabilidade, devido ao processo de degradação natural decorrente da exposição à radiação ultravioleta ao longo do tempo.

Sendo assim, a impermeabilização de locais de disposição de resíduos, impermeabilização de lagoas de tratamento e impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento e de armazenamento de substâncias perigosas são exemplos

de uma área da Geotecnia ambiental que evoluiu nas últimas décadas e as propriedades da camada impermeável devem ser norteadoras dos projetos na utilização de materiais alternativos. No que se refere à vida útil das geomembranas, este material utilizado como barreira pode sofrer degradação por intempéries, elevadas temperaturas, lixívias ou danos mecânicos devido ao contato com materiais agressivos em sua superfície. Estes danos mecânicos podem ocasionar a ruptura ou deformações indesejáveis ao material, o que pode conseqüentemente diminuir sua resistência e atuar como agente catalisador nos fenômenos de degradação química e biológica, sob condições de serviço.

Nesse sentido, o estudo sobre danos mecânicos, degradação ultravioleta e o efeito da temperatura encontrados tipicamente em geomembranas são apresentados a seguir.

### 3.2 DANOS MECÂNICOS

#### *Causa de danos*

A pequena espessura da geomembrana, associada aos materiais protuberantes com os quais ela pode estar em contato, tráfego de equipamentos, processos de instalação, queda de ferramentas, entre outros, a torna suscetível a danos mecânicos. Além desses danos mecânicos, falhas nas soldagens podem igualmente prejudicar o desempenho das geomembranas como barreiras em obras. A figura 3.2 ilustra um processo de instalação de geomembrana em obras geotécnicas. Nela pode se observar a vulnerabilidade à ocorrência de danos em virtude dos processos construtivos.

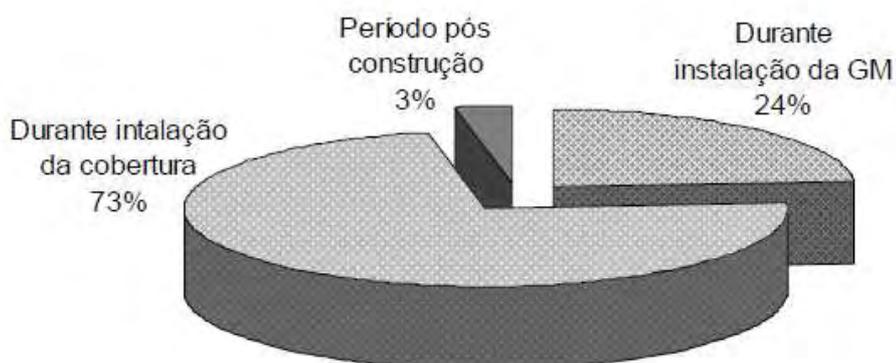
Figura 3.2 – Processo construtivo em obra envolvendo geomembranas.



Fonte: o próprio autor.

Nosko et al. (1996), reportam que 73% dos danos mecânicos são causados durante a colocação da camada sobrejacente à geomembrana, 24% são danos correspondentes à fase de instalação da própria geomembrana e apenas 3% dos danos são causados após o período construtivo (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Causa de danos em geomembranas

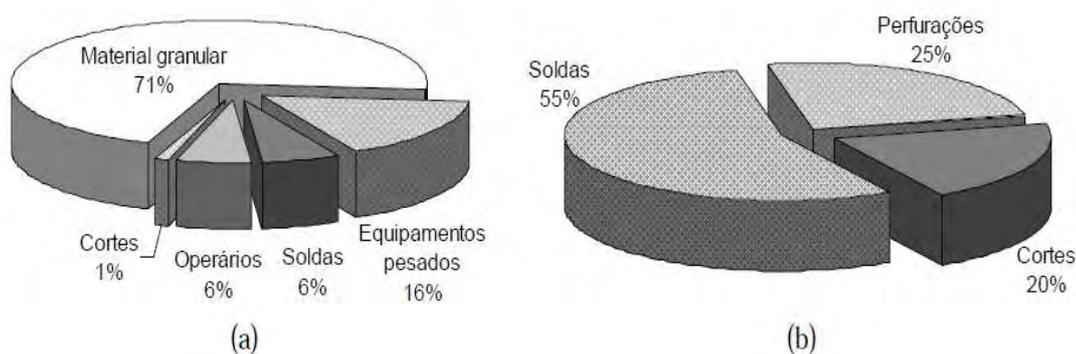


Fonte: Nosko (1996).

Dos dados detectados em geomembranas com cobertura de material granular, a maioria deles parece ser ocasionada pela instalação da primeira camada de coleta de chorume. Nosko e Touze-Foltz (2000) verificaram que 71% dos danos em geomembranas com cobertura drenante são causados pelo material granular durante a sua instalação, 16 % dos danos são causados por equipamentos pesados, 6% correspondem a falhas em soldas, 6% causados pelos operários e 1% são cortes.

No caso de geomembranas sem cobertura de material granular, as causas dos danos são diferentes, como reportado por Rollin et. al (1999). Em medições feitas em reservatórios, lagoas e aterros com a geomembrana ainda exposta, os autores verificaram que 55% dos danos eram relacionados a soldas, 25% eram perfurações causadas pela má qualidade de contato com o material subjacente e 20% correspondiam cortes (Figura 3.4). Em outro estudo, Paggs (2001) verificou que a maioria dos danos era devida à punção provocadas pelos materiais subjacentes à geomembrana, diferente do verificado por Rollin et. al (1999). Por se tratar de uma investigação de obra específica, os dados de Peggs (2001) mostram que a ocorrência de danos pode ser condicionada a alguma característica singular da obra, e comparações com dados da literatura, baseados em obras de características diferentes, pode não ser adequada.

Figura 3.4- Causas de danos em geomembranas (a) após a cobertura da camada granular.

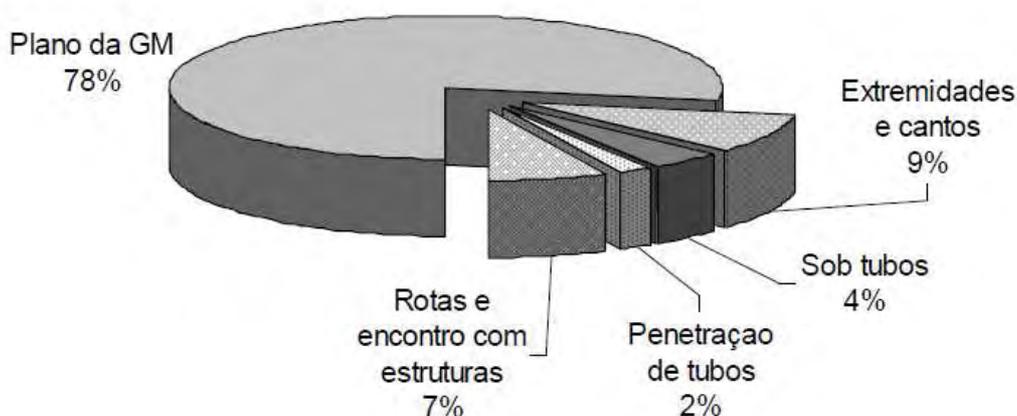


Fonte: Nosko e Touze-Foltz (2000) e Rollin et al. (1999).

### *Localização dos danos*

Rollin et al. (2002) agrupou os dados de pesquisas publicadas por Colucci e Lavagnolo (1995), Darilek et al. (1989), Laine e Darilek (1993) e Rollin et al. (1999), sobre danos mecânicos identificados em um total de mais de 1,5 milhões de m<sup>2</sup> de área estudada (em mais de 150 obras inspecionadas). Em reservatórios ou lagoas, 65% dos vazamentos localizados foram decorrentes de falhas em soldas, particularmente nas proximidades do encontro com tubulações ou remendos. Cortes decorrentes da queda de materiais cortantes foram encontrados nas proximidades dos cantos, reparos com soldas e remendos. Os 35% restantes foram vazamentos encontrados ao longo da geomembrana. Em aterros sanitários, Nosko e Touze-Foltz (2000), reportaram que a maioria dos dados, 78%, foram detectados na parte plana da geomembrana, 9% foram detectados nas extremidades e cantos, 4% sob tubos, 2% nas proximidades da penetração de tubulações e 7% nas rotas e encontros com estruturas (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Localização de danos em geomembranas em aterros sanitários.



Fonte: Nosko e Touze – Foltz (2000).

### *Tipo e dimensão dos danos*

Colucci e Lavagnolo (1995) estudaram 25 obras e verificaram que aproximadamente 80% dos danos são menores que 500 mm<sup>2</sup>. Laine (1991) analisou os furos nas soldas das geomembranas. O autor reportou uma densidade de 5 danos/ha com dimensões variando de 0,5 a 1 mm. Nosko e Touze-Foltz (2000) verificaram que os danos mecânicos relacionados com o tamanho dos grãos dos materiais sobrejacentes à

geomembrana têm, em geral, área de 50 a 200 mm<sup>2</sup>. Os dados dessas e outras pesquisas sobre o tipo e dimensão de danos verificados em geomembranas estão sumarizados na Tabela 3.2.

### 3.3 PROTEÇÃO CONTRA DANOS MECÂNICOS

Rollin et al. (1999), associaram a quantidade de danos observados nas geomembranas em obras reais a diversos fatores, dentre eles a qualidade da superfície do solo subjacente à geomembrana, como mostra a tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Qualidade da superfície subjacente à geomembrana (ROLLIN et al., 1999).

Qualidade	Materiais
Alta	Argila
Alta	Material granular 0–5 mm
Alta	Material granular 0–25 mm com bom geotêxtil de proteção
Média	Material granular 0–25 mm sem bom geotêxtil de proteção
Baixa	Material granular com partículas > 25 mm sem geotêxtil de proteção

Fonte: Rollin et al. (1999).

Segundo Geroto (2008), em estudo realizado sobre o desempenho de camadas de proteção para geomembranas, o emprego de camadas de proteção é de grande importância para garantir maior resistência das geomembranas aos esforços de punção, além de minimizar a ocorrência de danos em sua superfície que podem ocasionar perfurações e reduzir a resistência mecânica e o desempenho final desses materiais, quando empregados como parte integrante de barreiras de controle e desvio de fluxo e, como os resultados da pesquisa demonstraram desempenho superior, como elemento de proteção, dos geotêxteis de maior resistência mecânica e mecanismos de ruptura diferenciados entre geomembranas de PEAD e PVC.

Apesar do uso de geotêxteis, na interface entre a geomembrana e o material subjacente, melhorar a qualidade de contato na interface entre os materiais, geotêxteis são materiais drenantes, o que pode aumentar o vazamento no caso de dano na geomembrana. Esse assunto foi investigado por diversas pesquisas, conduzidas no sentido de verificar se a utilização de geotêxteis subjacentes à geomembrana poderia contribuir para aumentar o

fluxo no caso de dano. Devido ao risco de aumento de fluxo através de um geotêxtil subjacente em caso de dano na geomembrana, o uso de geocompostos bentoníticos, GCLs, tem sido difundido como uma opção para redução de vazamentos, uma vez que, além de melhorar a qualidade de contato na interface, GCLs apresentam baixíssima condutividade hidráulica quando hidratados.

Tabela 3.3 – Dimensões de danos em função do tipo de dano.

Autores	Dimensão do dano (mm <sup>2</sup> )	Furos	Rasgos	Cortes	Soldas	Área estudada (ha)
Colucci & Lavagnolo (1995)	0-20	44	31	12	11	27,6
	20-100	37	49	21	4	
	100-500	60	49	2	8	
	500-1000	22	11	0	4	
	1000-10000	10	22	0	1	
	> 10000	15	9	0	0	
Rollin et al. (1999)	< 2	3	-	0	18	24,1
	2-10	6	-	4	7	
	> 10	3	-	6	2	
Nosko & Touze-Foltz (2000)	< 50	332	-	5	115	325
	50-200	1720	236	36	105	
	200-1000	843	153	18	30	
Phaneuf & Peggs (2001)*	> 1000	90	496	-	15	63,4
	< 1 mm	10	0	4	2	
	2-10 mm	28	9	7	5	
	11-50 mm	7	2	21	3	
	51-100 mm	0	1	5	3	
	101-500 mm	1	0	2	1	
	501-1000 mm	0	0	0	3	
	> 1000 mm	0	0	2	2	
Desconhecido	4	1	5	3		

\* Dimensão do dano expressa em unidade de comprimento ao invés de área.

### 3.4 DEGRADAÇÃO ULTRAVIOLETA

A luz solar é o fator dominante de degradação em muitos polímeros, utilizados nos materiais geossintéticos (SUITS; HSUAN, 2003). A vida útil de uma determinada geomembrana que ficará exposta aos raios UV pode ser avaliada por testes acelerados de exposição em laboratório, de acordo com os ensaios das normas ASTM G26 e G53, por exemplo. No entanto, outros ensaios padronizados pela ASTM D1435 e D4364 são geralmente mais utilizados. Estes últimos utilizam a exposição excessiva ao tempo e são algumas vezes acelerados pela rotação de espelhos que intensificam a energia solar.

Os polímeros apresentam sensibilidades fotodegradativas diferenciadas à luz UV de diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ). Essas variações de sensibilidade são decorrentes das diferenças em suas estruturas moleculares e composições químicas. A sensibilidade máxima de vários polímeros, determinadas pelas energias de dissociação de suas ligações químicas, está dentro de uma região da radiação UV com comprimentos de onda entre 290 e 400nm.

As principais alterações causadas nos polímeros pela radiação UV, expressam-se pelo amarelecimento do material, modificações em sua superfície (embaçamento, descoloração, superfície quebradiça e endurecimento superficial) e diminuição das propriedades mecânicas (LODI, 2003).

Koerner e Koerner (1995), analisaram o comportamento da geomembrana de PEAD expostas em campo. Exposta à luz, uma geomembrana é submetida a três fenômenos físicos: radiação, condução e convecção. A radiação é o fenômeno no qual a energia é transmitida por ondas eletromagnéticas. O fenômeno de condução é caracterizado pela transferência de calor causada por um gradiente de temperatura. A convecção consiste no fenômeno de transferência do calor por movimentação em nível molecular. A primeira parte da pesquisa avaliou o comportamento de geomembranas pretas, brancas, texturizadas e lisas expostas a condições de campo ao longo do ano. Verificou-se que a temperatura nas geomembranas brancas foram sempre inferiores as demais. Uma pequena diferença foi evidenciada entre as geomembranas lisas e as texturizadas, sendo que essas últimas apresentaram as menores temperaturas. A segunda parte da pesquisa consistiu na análise da ocorrência de ondas devido à exposição à luz em uma

geomembrana lisa (preta) de PEAD com espessura de 1,5mm. As condições climáticas (sol, chuva e vento) são parâmetros importantes no desenvolvimento das ondas. A presença de sol e a ausência de vento aumentarão as temperaturas nas mantas e o material e o material irá expandir-se ocasionando as ondas ou rugas. A não formação de ondas e redução da temperatura podem ser obtidas pela utilização de um geotêxtil ou cascalho como cobertura das geomembranas.

De acordo com Lodi (2003), em estudo realizado sobre os aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade e de poli cloreto de vinila, após 6 meses de exposição à radiação UV, as variações sofridas pelo PVC foram praticamente inexpressivas em relação às amostras intactas enquanto que o PEAD tornou-se um pouco mais dúctil em relação a estas, além disso, concluiu-se que as geomembranas obtiveram maiores variações nas propriedades mecânicas que nas propriedades físicas conforme processo de envelhecimento empregado (intempérie, lixívia, estufa convencional, radiação UV).

Dessa forma, as geomembranas podem sofrer degradação e apresentar fissuras quando expostas por longos períodos aos efeitos da intempérie. De acordo com Hshuan et. al (1991) ocorre, nesses casos, o início da degradação por radiação térmica e ultravioleta que irá conduzir a formação de radicais livres e, conseqüentemente, a degradação oxidativa. O fissuramento tem início e a geomembrana torna-se susceptível ao fenômeno do fissuramento sob tensões (*stress cracking*) o que pode conseqüentemente afetar os parâmetros de permeabilidade das geomembranas.

### 3.5 DEGRADAÇÃO TÉRMICA

Várias propriedades de geomembranas poliméricas são sensíveis a mudança de temperatura. Quando as geomembranas são expostas ao calor, são submetidas a mudanças em suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. O tempo e severidade da exposição determinarão o grau dessas mudanças. Com o aumento da temperatura, pode haver perda das substâncias voláteis como os solventes e plastificantes. Uma conseqüência do aumento da temperatura é o aumento da cristalinidade do material (polímeros cristalizáveis), e conseqüentemente, aumento de sua densidade.

Muitas propriedades das geomembranas são dependentes da faixa de temperatura onde são empregadas. Uma temperatura elevada pode conduzir a: (1) decréscimo de rigidez da manta, (2) redução na resistência a agentes químicos, (3) aumento na velocidade de fluência e (4) aumento no processo termo-oxidativo. Por outro lado, uma baixa temperatura pode causar: (1) aumento na rigidez da manta, (2) formação de condensação que pode causar dificuldades no processo de sondagem com solventes e substâncias adesivas, (3) trincas em membranas rígidas de PE devido ao elevado coeficiente de expansão térmica (LODI, 2003).

Segundo Lodi (2003), no estudo sobre os aspectos de degradação das geomembranas, no que se refere aos efeitos da temperatura, as geomembranas de PEAD em estufa apresentaram uma tendência de aumento de sua deformabilidade e conseqüentemente diminuição de sua rigidez, tornando-se mais dúcteis.

Dessa forma, a temperatura é um parâmetro importante no processo de envelhecimento dos materiais poliméricos devido a sua capacidade de influenciar as taxas de reações, propriedades mecânicas e de abrasão, podendo também afetar os parâmetros de permeabilidade das geomembranas.

### 3.6 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

A literatura apresenta uma variedade de métodos de ensaios para a avaliação da permeabilidade de membranas poliméricas quando em contato com diferentes tipos de líquidos ou resíduos químicos.

Nenhum material é absolutamente impermeável, e a taxa de permeabilidade relativa das geomembranas é muito discutida. Os ensaios são adaptações de ensaios usados em engenharia geotécnica, medindo-se a permeabilidade da água através da geomembrana. No entanto, isto pode ser impraticável. Em muitos casos, a carga hidráulica requerida costuma ser muito alta podendo ocorrer vazamentos ou problemas na própria amostra que podem causar variações nos resultados. Ademais, esses valores elevados de carga hidráulica são muito superiores aos valores encontrados em situações reais de campo. Sob cargas hidráulicas baixas, o tempo de ensaio é muito longo, podendo ocorrer a evaporação da água (SHARMA; LEWIS, 1994; KOERNER, 1998). Esses autores

preferem utilizar o termo *coeficiente de migração* ao invés de *coeficiente de permeabilidade*.

Então, uma análise diferente é feita usando vapor d'água. Alguns métodos de avaliação da permeabilidade ao vapor são baseados na lei da difusão. Os ensaios de vapor de água em geomembranas são realizados de acordo com a ASTM E96. Esse ensaio é denominado Razão de Transmissão de Vapor d'água (WVT - sigla internacional). Neste, a massa de vapor d'água que passa por uma dada área da geomembrana (por um dado período de tempo e sob uma pressão específica que pode variar de um ensaio a outro) é igual a WVT, como mostrado na equação (1) abaixo. A partir do valor WVT obtido, pode-se usar de correlações (equação 2) para a obtenção da permissividade e da permeança (equação 3). É necessário, portanto, conhecer a pressão de vapor durante o ensaio. Algumas vezes somente a temperatura e a umidade relativa do vapor são fornecidas, e a pressão de vapor pode então ser deduzida a partir da (equação 4). O coeficiente de permeabilidade  $k$  é obtido pelo produto entre a permissividade e a espessura da geomembrana (equação 5).

$$WVT = \frac{M}{A.t} \rightarrow [g / m^2.dia] \quad (1)$$

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

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

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

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

Onde:  $M$ = massa de fluido passando pela geomembrana;  $A$ = área do espécime de geomembrana;  $t$ = período de tempo;  $p$ = pressão de vapor;  $\omega$ = permeança;  $\psi$ = permissividade;  $g$ = gravidade;  $p_s$ = pressão de vapor saturado a uma dada temperatura (que pode ser encontrado em tabelas físicas);  $H$ = umidade relativa;  $k$ =permeabilidade,  $T$ =espessura da GM.

Haxo e Pierson (1991) apresentam uma descrição de alguns ensaios e alguns resultados obtidos para estes. Esses ensaios listados pelos autores são os seguintes:

- a) Permeabilidade de geomembranas a gases
- b) Permeabilidade de geomembranas a misturas de vapor
- c) Permeabilidade de geomembranas a vapores orgânicos
- d) Permeabilidade de geomembranas em amostras dissolvidas
- e) Permeabilidade de geomembranas à água sobre pressão

Os autores supracitados analisando vários procedimentos para a determinação da permeabilidade de geomembranas a gases, vapores líquidos, etc. apresentam algumas conclusões sobre os ensaios de permeabilidade, a saber:

*Sobre o mecanismo de difusão:*

1. O transporte ou fluxo de amostras químicas através da membrana polimérica é um processo que consiste de 3 passos sucessivos: a) dissolução de amostras dentro da superfície da membrana na parte superior do fluxo; b) difusão das amostras através da membrana do maior potencial químico para o menor e, c) saída das amostras por evaporação ou dissolução no líquido na parte inferior do fluxo;
2. O transporte de amostras através de uma membrana polimérica está numa escala molecular através da difusão;
3. A força motriz para o fluxo ou transporte através de uma membrana é o potencial químico indicado por gradientes na concentração de amostras, pressão de vapor ou temperatura e pressão hidrostática através da membrana;
4. As geomembranas são *permeoseletivas*, ou seja, as taxas de permeabilidade de amostras diferentes diferem dependendo, sobretudo da solubilidade e difusividade destas amostras com a membrana;
5. Amostras inorgânicas como sais metálicos dissolvidos não passam através das geomembranas e,
6. A água pode passar por pressão por uma membrana. Contudo, a água menos contaminada da parte inferior do fluxo de um liner de geomembranas pode migrar através desse liner em sentido contrário à aplicação da pressão hidrostática da água na

parte superior do fluxo, que é mais contaminada. Essa situação pode ser encontrada em depósitos de resíduos.

*Sobre os ensaios de permeabilidade:*

1- Sabe-se o que é realmente medido durante o ensaio: um coeficiente de difusão (correspondendo a um gradiente de concentração na membrana) ou um coeficiente de permeabilidade; para um gás, esse coeficiente de permeabilidade pode ser relacionado com o coeficiente de difusão, mas não para um líquido, onde o correspondente coeficiente de permeabilidade é definido por uma pressão hidrostática;

2 - De acordo com a pequena quantidade de difusão do fluido através da membrana, a medida da taxa de fluxo deve ser muito precisa e deve-se levar em conta o vazamento (fuga) devido ao aparelho e,

3- Outras características das membranas têm de ser conhecidas para se proceder corretamente aos cálculos dos coeficientes de permeabilidade e difusão: particularmente, a espessura e peso específico da membrana devem ser conhecidos como funções da absorção do fluido, temperatura e tempo.

Os coeficientes de difusão e permeabilidade são características importantes de geomembranas e deveriam ser mais utilizados para projetos principalmente em emendas, membranas sob tração e em membranas sujeitas a diferentes lixívias. Os ensaios de permeabilidade são reconhecidos como os ensaios mais sensíveis para se caracterizar o envelhecimento das geomembranas. A grande dificuldade reside no fato de se exumar amostras das obras. Dessa forma, é interessante projetar simuladores de aterros verificando-se as características mecânicas e de permeabilidade das geomembranas antes e após alguns períodos de exposição às lixívias nos simuladores.

Todos os materiais usados como *liners* são permeáveis a fluidos (líquidos ou gases) e uma certa quantidade de vazamentos deve ser esperada através do *liner*. Vazamentos adicionais podem ser ainda resultado de fissuras, furos e falhas nas emendas (GIROUD, 1997).

As geomembranas instaladas em obras ambientais apresentam defeitos. As principais causas desses defeitos estão enumeradas a seguir: a) defeitos de fabricação das geomembranas: muitos fabricantes e usuários não efetuam o correto controle de qualidade resultando em danos e furos no processo de fabricação; b) danos de

instalação: causados por diversos motivos como o incorreto manuseio dos painéis, temperatura de soldagem inadequada, drenos de brita em contato direto com a geomembrana, disposição de resíduos com protuberâncias em contato direto com a geomembrana, etc; c) fenômeno de tenso fissuramento: ocorre em geomembranas de PE o microfissuramento sob tensões principalmente em meios com solventes e surfactantes e, d) recalques diferenciais em aterros sanitários: este problema é geralmente associado à inadequada preparação do terreno de base do aterro.

A permeabilidade por defeitos é ainda aumentada pelo contato deficiente entre a geomembrana e o solo subjacente. Este fenômeno pode ser aumentado pelo contato da geomembrana com o calor solar durante sua instalação que pode provocar o surgimento de ondas e impedir que a geomembrana fique em contato com o solo.

Sharma e Lewis (1994) especificam que os vazamentos ocorrem em geomembranas por permeabilidade e que os fluxos ocorrem por meio de defeitos. Os fluxos que ocorrem pelos defeitos podem ser divididos em *fluxo por microfuros* e *fluxo por furos*. Os microfuros são definidos como defeitos que criam furos com dimensões menores que a espessura da geomembrana. Os furos são aberturas que possuem dimensões iguais ou maiores que a espessura da geomembrana. O fluxo através de um microfuro é considerado análogo ao fluxo através de um tubo e é calculado segundo a lei de *Poiseuille* (equação 6).

$$Q = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot h_w \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot T_g} \quad (6)$$

$Q$  é o fluxo através do microfuro;  $\rho$  é a densidade do líquido;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $h_w$  é a profundidade do líquido acima da geomembrana;  $d$  é o diâmetro do microfuro;  $\eta$  é a viscosidade dinâmica do líquido e  $T_g$  é a espessura da geomembrana.

O fluxo através de um furo é afetado pela permeabilidade dos materiais que se encontram no lado oposto da membrana, uma vez que estes podem reduzir o fluxo pelo furo.

Dessa forma, assume-se que estes materiais possuem permeabilidade infinita e a taxa de fluxo é obtida por meio da equação de *Bernouilli* para orifícios (equação 7). Materiais com permeabilidade maior que 0,1 cm/s podem ser considerados como tendo uma permeabilidade infinita.

$$Q = C_B \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_w} \quad (7)$$

Q é o fluxo através do furo;  $C_B$  é o coeficiente relacionado à forma das bordas da abertura (para bordas pontiagudas ou afiadas,  $C_B = 0.6$ );  $a$  é a área do furo;  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h_w$  é a profundidade do líquido acima da geomembrana.

Existem vários modelos para a permeabilidade através de defeitos em geomembranas. Foose et. al. (2001) apresentam uma revisão destes modelos podendo-se destacar entre eles a solução empírica de Giroud (1997), aprimorada por Giroud et al. (1998), a solução analítica de Rowe (1998) além das equações derivadas propostas pelos próprios autores. Essas formulações estão apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Formulações recomendadas para cálculo de permeabilidade através de geomembranas.

Hipótese de cálculo	Log ( $k_i/k_w$ )	Formulação Recomendada
Defeitos Circulares		
Contato Perfeito	1	Foose et al (2001)
Camada Espessa	>4,5	Rowe (1998) ou Giroud (1997)
Camada Espessa	<4,5	Modelo Numérico
GCL	>4	Rowe (1998)
GCL	<4	Fosse et al (2001)
Defeitos Longilíneos		
Contato Perfeito	1	Fosse et al (2001)
Camada Espessa	>4,5	Fosse et al (2001)
Camada Espessa	<4,5	Modelo Numérico
GCL	>4	Rowe (1998)
GCL	<4	Fosse et al (2001)

Fonte: Queiroz (2002).

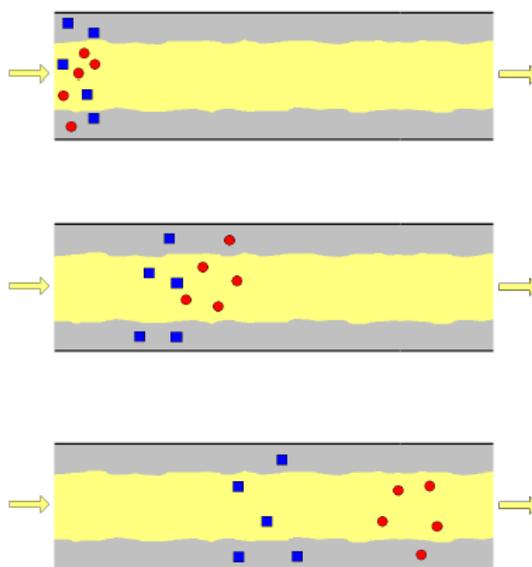
Nas geomembranas ocorrem também fenômenos de sorção e estes assumem grande importância no transporte de contaminantes através dos polímeros. Rowe (1998) ressalta que os fenômenos de sorção aumentam o coeficiente de difusão aparente das geomembranas quando se analisa a concentração das substâncias no meio circundante (e não na própria geomembrana).

### 3.7 ENSAIOS DE CROMATOGRAFIA

De acordo com Valentin (2008) a cromatografia consiste de técnicas que tem em comum a separação de componentes de misturas, por séries de equilíbrios que resultam na separação de compostos. Como resultados de suas partições (sorções diferenciais) entre duas fases diferentes, uma estacionária com uma grande superfície e outra sendo uma fase móvel em contato com o primeiro. A cromatografia não está restrita em separações analíticas, podendo ser usada na preparação de substâncias puras, estudo de cinéticas de reação, investigação estrutural de moléculas e determinação de constantes físico-químicas, incluindo constante de estabilidade de complexos, entalpia, entropia e energia livre (GROB, 2004).

A Figura 3.6 mostra um esquema básico de funcionamento de uma separação cromatográfica.

Figura 3.6 - Separação por interações analito-fase estacionária.



Fonte: Grob (2004).

#### *Cromatografia gasosa (cg)*

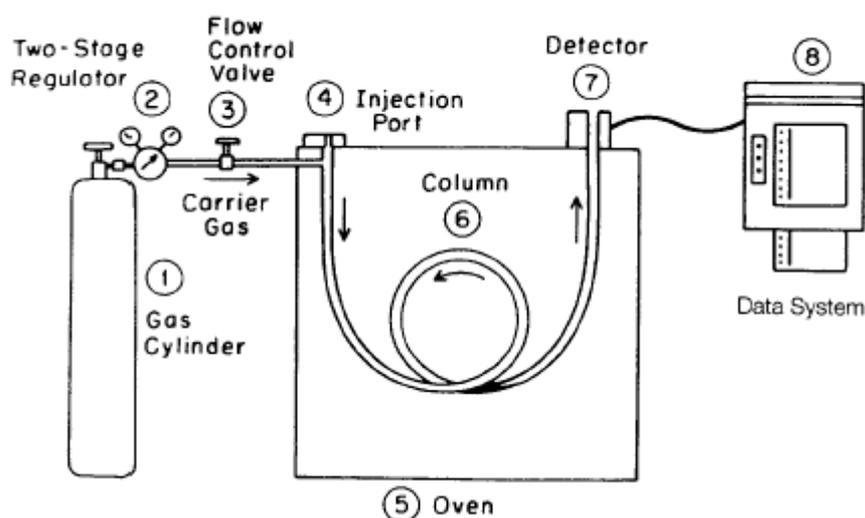
A Cromatografia Gasosa (CG) é uma das mais importantes técnicas analíticas por ter, principalmente, se tornado disponível comercialmente há mais de uma década antes da Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (*High Performance Liquid Chromatography*

*HPLC*). Este fato remete ao maior e moderno avanço dos instrumentos de análises e rotinas analíticas (BRAITHWAITE, 1999).

Desenvolvimentos constantes da teoria da CG, colunas e detectores seguiram até a introdução das colunas capilares como uma alternativa em relação às colunas empacotadas. Golay propôs em 1958 que a eficiência da coluna poderia ser aumentada pela eliminação das colunas empacotadas, isto é, usando colunas abertas tubulares que poderiam ser consideravelmente maiores. Desenvolvimentos mais interessantes e rápidos da instrumentação e aplicações continuaram, com a cobertura da fase estacionária das paredes internas inicialmente usando metais e vidro. Colunas mais robustas e com capacidades para maiores temperaturas foram desenvolvidas na década de 1980, a partir da introdução de colunas de sílica pura e fases estacionárias ligadas na parede interna da coluna. Modificações e novas fases estacionárias são continuamente introduzidas, no entanto, o desenvolvimento nas últimas décadas tem sido aperfeiçoado com a engenharia instrumental, usando tecnologias com microprocessadores e unindo a CG com as técnicas espectroscópicas, particularmente a espectrometria de massas, auxiliando a identificação dos analitos (BRAITHWAITE, 1999).

A Figura 3.7 representa esquematicamente um cromatógrafo a gás.

Figura 3.7 – Esquema das partes básicas de um cromatógrafo a gás simples.



Fonte: Braithwaite (1999).

### *Detector -espectrometria de massas*

Trata-se de uma versão simplificada e econômica de um espectrômetro de massas, adequado à detecção de picos cromatográficos. Surgiu no início da década de 80 em duas versões mais populares denominadas ITD (“ion trap detector”) pela Finnigan e de MSD (“mass selective detector”) pela Hewlett Packard. Cada pico eluído da coluna de cromatografia gasosa é bombardeado com uma fonte ionizante (geralmente impacto por elétrons nas versões mais simples) conseguindo fragmentar o composto em uma grande diversidade de íons.

Os íons são separados em um analisador (neste caso utilizam-se quatro barras denominadas quadrupolo, submetidas a um campo elétrico). A interação dos fragmentos iônicos com o campo elétrico faz com que apenas os íons de determinada relação massa/carga ( $m/z$ ) passem intactos e sem colidirem com as barras do quadrupolo. Variando-se o campo elétrico, torna-se possível efetuar uma varredura através de ampla faixa do espectro de massas de interesse. No caso de detectores de massa, para manter o custo compatível com outros detectores cromatográficos, o sistema possui algumas limitações quando comparado com sistemas maiores de espectrometria de massas acoplado a cromatografia gasosa (GC/MS).

Apesar de conceitualmente similares, os detectores de massas são dotados de bombas de vácuo de menor capacidade, o que dificulta (ou até mesmo impede) seu uso com colunas empacotadas sendo, usualmente, limitadas ao uso com colunas capilares. Geralmente possuem apenas uma forma de ionização, por impacto por elétrons, o que dificulta obterem-se informações a respeito do íon molecular (e, como consequência, da massa molecular do composto de interesse) (LANÇAS, 1993).

O conceito é baseado na formação de íons positivos pela simples remoção de um elétron da molécula original. Para uma molécula hipotética M, o processo pode ser representado por:



O íon  $M^+$  é conhecido como íon molecular. Duas das mais importantes propriedades de um íon é a carga ( $z$ ) e a massa ( $m$ ). Um espectrômetro de massa mede a razão massa carga ( $m/z$ ) do íon. O íon é formado com uma carga unitária positiva, então  $z$  será +1 e

assim a razão de troca de massa será equivalente à massa do íon. A massa do íon estará relacionada com a massa molecular relativa da molécula (DAVIS,1995).

A combinação dos dois componentes dentro de um sistema simples de GC/MS forma um instrumento capaz de separar misturas em seus componentes individuais, identificar e dar as respostas quantitativas e qualitativas das quantidades e das estruturas químicas de cada composto, mas ainda possuindo algumas limitações. O sistema requer que os compostos sejam voláteis e, por isso, há alguns limites de massa molecular (MCMASTER, 1998).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

Para realização da pesquisa foram realizados diversos ensaios nas geomembranas por meio do ensaio de permeabilidade denominado de Razão de Transmissão de Vapor d'Água (WVT), já que as geomembranas são materiais de baixíssima permeabilidade, o que torna difícil quantificar a permeabilidade destes elementos por meio dos métodos tradicionais. Neste ensaio, os corpos de prova são acoplados a um recipiente com o fundo preenchido com água ou outro líquido, em que é verificada a variação de massa do conjunto, em determinados intervalos de tempo, para condições de temperatura e umidade do ar conhecidas.

Os materiais utilizados na pesquisa foram geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) fornecidas por empresas nacionais. Utilizou-se também balança de precisão, recipientes de alumínio com parafusos e vedantes, além de aparelho marcador de temperatura e de umidade. As substâncias utilizadas para os ensaios foram água, álcool, óleo diesel e gasolina. As etapas de ensaios estão apresentadas a seguir:

- a. Ensaios de permeabilidade em geomembranas intactas (ASTM E96);
- b. Ensaios de permeabilidade em geomembranas com furos de 1,6 e 3,0 mm;
- c. Ensaios de permeabilidade em geomembranas expostas à radiação ultravioleta (ASTM D1435 - intempérie) por mais de 10 anos para comparação de situações típicas de canais onde as geomembranas ficam expostas aos raios solares;
- d. Ensaio de permeabilidade em geomembranas expostas a envelhecimento térmico acelerado em estufa com circulação de ar (ASTM D573) por 3 e 6 meses (temperatura de incubação igual a 85 graus) e,
- e. Ensaio de difusão no qual a geomembrana entra em contato com solo contaminado por hidrocarboneto com posterior avaliação do processo difusivo por meio de cromatografia gasosa com detector de massa.

Antes da realização dos ensaios de permeabilidade, foram feitos ensaios de caracterização das amostras. A descrição dos ensaios realizados é apresentada a seguir.

## 4.2 GEOMEMBRANAS

Na pesquisa foram utilizadas geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade) com espessura de 1,0mm. A escolha deve-se ao fato de estas serem as mais difundidas no meio técnico e pela maior experiência de aplicação desse tipo de material entre os profissionais da área. A figura 4.1 apresenta as geomembranas utilizadas na pesquisa.

Figura 4.1 – Geomembranas utilizadas na pesquisa.



Fonte: o próprio autor.

Para caracterização das propriedades físicas e mecânicas, as geomembranas de PEAD foram submetidas a ensaios realizados no Laboratório de Geossintéticos da EESC/USP. A tabela a seguir apresenta os ensaios realizados nas geomembranas e as respectivas normas.

Tabela 4.1 – Ensaios realizados para caracterização das geomembranas.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma</b>
<b>Físicas</b>	
Espessura nominal	ASTM D 5199
Densidade específica	ASTM D 792
<b>Mecânicas</b>	
Resistência à tração	ASTM D 6693

#### 4.2.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Para a caracterização das propriedades físicas das geomembranas, foram realizados ensaios de espessura nominal e densidade.

A espessura nominal das geomembranas, foi determinada por um equipamento constituído por um relógio comparador acoplado a uma base metálica e com um disco metálico que aplica uma pressão de 20 KPa na superfície da geomembrana.

Para determinar a densidade das amostras das geomembranas utilizadas, foi verificada a variação da massa seca do corpo de prova em relação à massa do mesmo corpo de prova imerso em água destilada, de acordo com o Princípio de Arquimedes.

A execução do ensaio para determinar a espessura das geomembranas está ilustrada na figura 4.2(a), enquanto que a figura 4.2(b) apresenta a determinação da massa da geomembrana imersa em água, para a determinação da densidade dos materiais. Figura

4.2 – Em (a), equipamento utilizado para determinação das espessuras das geomembranas e em (b), balança utilizada para determinação da densidade em geomembranas.



(a)



(b)

Fonte: Geroto (2008).

#### 4.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para caracterização das propriedades mecânicas das geomembranas foi realizado o ensaio de resistência à tração em geomembranas de PEAD, em que foi determinada a resistência à ruptura deste material.

Neste ensaio é utilizada uma prensa mecânica que permite controlar as condições de contorno (velocidade, força e critérios de paralisação), além da aquisição e armazenamento de dados através da conexão a um computador.

A figura 4.3 ilustra o equipamento utilizado para os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas.

Figura 4.3 – Prensa mecânica utilizada nos ensaios de caracterização mecânica.



Fonte: Geroto (2008).

### 4.3 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Como as geomembranas apresentam permeabilidade extremamente baixa, os ensaios convencionais, como o ensaio de permeabilidade de carga variável, utilizado para solos ou materiais de baixa permeabilidade, não são adequados para esta pesquisa, pois se necessitaria de muito tempo para obter resultados satisfatórios em termos de estudo. Assim, este trabalho emprega um método indireto para determinação da permeância e posteriormente do coeficiente de permeabilidade de membranas de baixíssima permeabilidade de acordo com a norma ASTM E96. O princípio básico é a utilização da Lei de Fick com adequação à lei de Darcy. Desta forma, foram confeccionados recipientes de alumínio de diâmetro interno médio de 75mm na forma de um tronco cilíndrico com a parte superior alargada e com furos na extremidade para fixação dos parafusos, conforme ilustra a Figura 4.4.

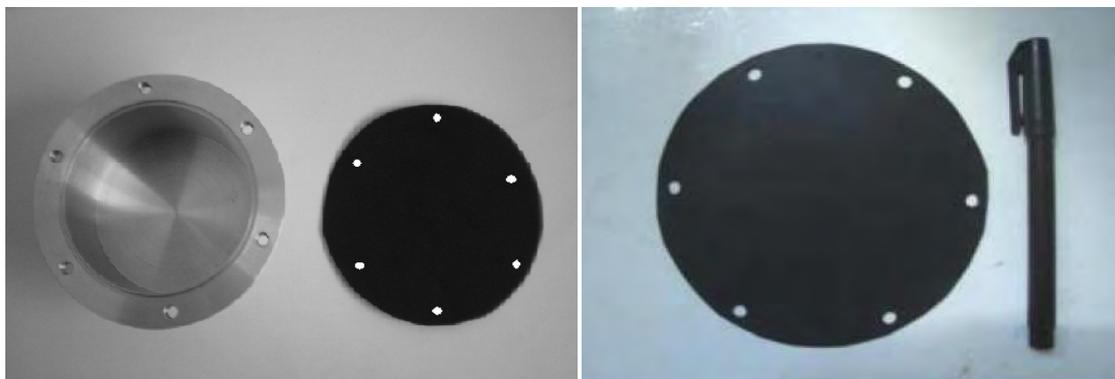
Figura 4.4 – Detalhes do recipiente de alumínio de diâmetro interno médio de 75 mm utilizado no ensaio de permeabilidade.



Fonte: o próprio autor.

Em seguida obteve-se geomembranas de polietileno de alta densidade na forma circular com furos na extremidade para fixação dos parafusos, como está ilustrado na Figura 4.5.

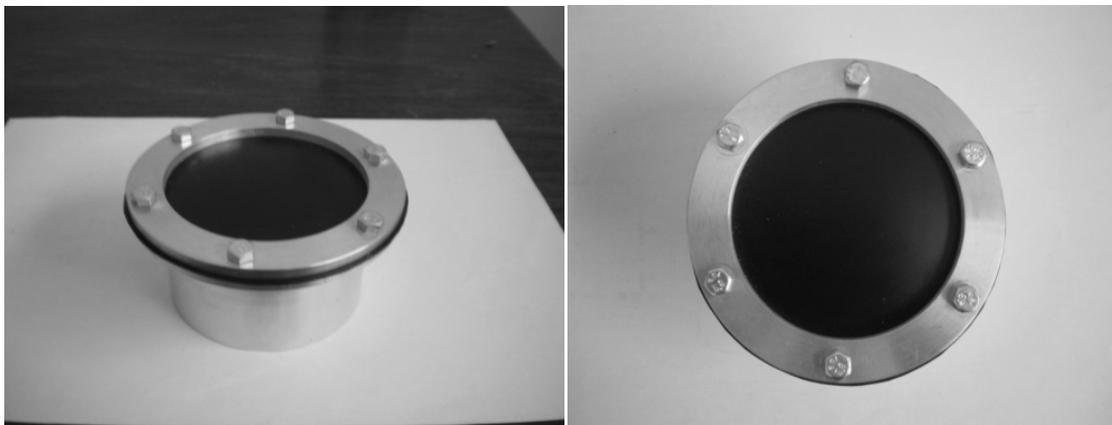
Figura 4.5 – Geomembrana circular com furos na extremidade ao lado do recipiente metálico.



Fonte: o próprio autor.

Colocando-se água (líquido padrão) ou outro líquido dentro do recipiente de alumínio, a geomembrana foi adequadamente fixada, obtendo-se o conjunto ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Vista lateral e vista superior do conjunto.

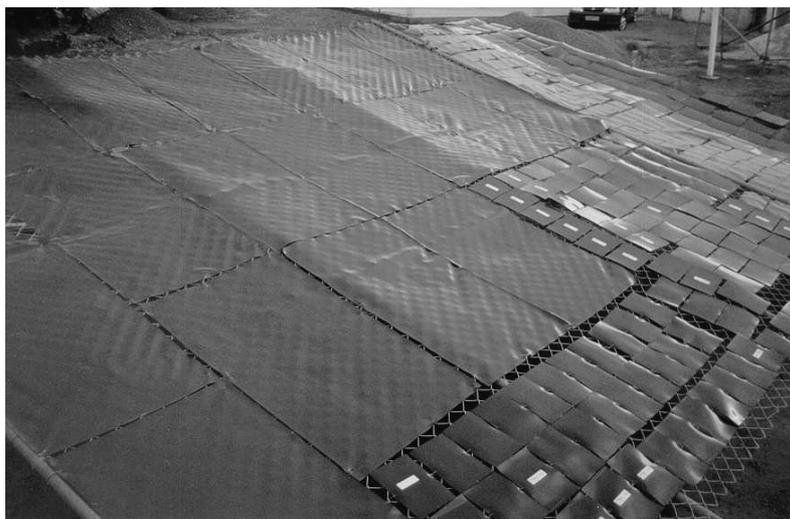


Fonte: o próprio autor.

Assim, foi possível analisar a permeabilidade por meio do ensaio de perdas de massa. As substâncias colocadas dentro dos componentes metálicos foram a água, o álcool, a gasolina e o óleo diesel. O ensaio foi realizado com três amostras para cada substância. Por meio de uma balança com precisão de quatro casas decimais foi possível pesar as massas das amostras diariamente. Para realização da pesquisa, também anotou-se a umidade, a temperatura e a hora de cada pesagem. Isso deve-se ao fato do processo como um todo utilizar a lei de Fick que estabelece que a diferença de pressão num ambiente controlado permite medir o fluxo que passa de um meio para outro controlando-se a perda ou ganho de massa dentro do recipiente.

Na pesquisa, foram estudadas geomembranas intactas (sem algum tipo de dano), geomembranas com microfuros (furos com a dimensão menor que a espessura), geomembranas com furos de 1,6 e 3,0 mm e de geomembranas que foram expostas à radiação UV por mais de 10 anos para comparação de situações típicas de canais onde as geomembranas ficam expostas aos raios solares (Figura 4.7) e também processo difusivo a hidrocarbonetos (álcool, gasolina e óleo diesel), além de geomembranas expostas ao calor em estufa (Figura 4.8).

Figura 4.7 - Detalhe das geomembranas expostas à intempérie.



Fonte: o próprio autor.

Figura 4.8 – Geomembranas expostas em estufa.



Fonte: o próprio autor.

De acordo com as equações supracitadas (equações 1 a 5) foi possível obter os parâmetros de permeabilidade para cada amostra em estudo.

#### 4.4 ENSAIOS DE DIFUSÃO

O processo de armazenamento dos combustíveis tem sido de grande interesse nas últimas décadas tendo em vista que os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), presentes nos combustíveis automotivos, gasolina e óleo diesel, fazem parte de uma importante classe de contaminantes dos solos e de águas subterrâneas, por trazerem

grandes prejuízos à saúde humana. Os acidentes ambientais em postos e sistemas retalhistas de combustíveis, com destaque para o comércio varejista de combustíveis automotivos, caracterizam-se como uma importante fonte de contaminação do solo e de águas subterrâneas, principalmente nas regiões metropolitanas. Ademais, o processo de contaminação expõe os seres humanos a substâncias tóxicas, entre as quais estão os hidrocarbonetos monoaromáticos, mais conhecidos como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos).

Dentro do contexto dos hidrocarbonetos, houve também um conseqüente acréscimo no número de postos de abastecimento. Isto remete a uma maior probabilidade de ocorrências de vazamentos em tanques de armazenamento.

Assim, por meio do ensaio de difusão é possível quantificar as perdas (vazão) que por ventura possam ocorrer nas diferentes aplicações desses materiais, em particular, junto aos tanques de armazenamento de hidrocarbonetos onde eventuais vazamentos ou derrames podem ocorrer.

Dessa forma, para os ensaios de difusão através da contaminação do solo, foram utilizados permeâmetros semelhantes ao usados no ensaio descrito anteriormente. Foram confeccionados recipientes de alumínio na forma de tronco cilíndrico de diâmetro interno médio de 93,4mm com alargamento na parte vazada e furos na extremidade para fixação dos parafusos. Foram utilizados dois destes recipientes de alumínio para a montagem de cada ensaio. Podem-se visualizar os dois componentes metálicos empregados no experimento na Figura 4.9, a seguir:

Figura 4.9 - Detalhe do permeâmetro.



Fonte: o próprio autor.

Como pode ser visto na figura 4.9, o equipamento possui um pequeno orifício em sua extremidade. Uma quantidade aproximada de 700 gramas de solo foi colocada em cada permeâmetro assim como o hidrocarboneto (álcool, gasolina e diesel) para efetuar a contaminação do mesmo. Foi utilizado um solo local com a seguinte classificação granulométrica: areia fina argilosa. Esse solo é considerado colapsível apresentando índice de vazios em torno de 1,0 e porosidade de 50%. Ressalta-se que a escolha desse solo (arenoso) foi feita bom base no fato de que a troca catiônica do processo difusivo é mínima, ou seja, em sua totalidade o processo difusivo será comandado pela membrana e não pelo solo. A inclusão de um solo argiloso para posterior análise permite comparar as diferenças desse processo.

Na interface dos copos foi colocada uma geomembrana para a avaliação do processo difusivo e de contaminação do solo (Figura 4.10)

Figura 4.10 – Vista superior e lateral do conjunto.



Fonte: o próprio autor.

Finalizando, a outra extremidade do recipiente metálico (com orifício) foi colocada por cima do conjunto, fixado por meio de parafusos e, pela abertura, foram adicionadas cerca de 200 ml de água. Deste modo, o conjunto final do ensaio ficou: recipiente de alumínio sem orifício contendo solo e contaminante, geomembrana e componente metálico com orifício contendo água. O ensaio foi mantido na posição horizontal para melhor estudo dos coeficientes de difusão da geomembrana. O recipiente e ensaio montados podem ser vistos nas Figuras 4.11 a seguir:

Figura 4.11 – Recipiente montado e preparado para o ensaio.



Fonte: o próprio autor.

Para realizar a coleta mensal das amostras, foi feita a limpeza dos frascos e da pipeta utilizando água destilada para a lavagem e a estufa do laboratório de saneamento para a secagem destes. O recipiente foi alternado da posição horizontal para a vertical cuidadosamente dez vezes para que o contaminante e a água ficassem numa proporção mais homogênea. Posteriormente foi utilizada uma pipeta de 5 ml, para a coleta desta mesma quantidade de amostra.

#### 4.4.1 CROMATOGRAFIA GASOSA

Para a análise cromatográfica dos HPAs utilizou-se um Cromatógrafo a Gás da marca Shimadzu e modelo GC 2010, acoplado a um Espectrômetro de Massas da mesma marca e modelo GCMS 2010 Plus, com auto sampler AOC 5000. A coluna utilizada foi do tipo RTx-5MS, 30 metros de comprimento x 0,25 mm de diâmetro interno x 0,25  $\mu\text{m}$  de espessura de filme.

Os analitos foram extraídos do solo contaminado, dos ensaios de recuperação e das amostras de água pela extração em fase sólida, em cartuchos da marca Varian. A água foi passada diretamente pelo cartucho e os analitos foram eluidos com 0,5 mL de metanol + 3 mL de acetato de etila + 3 mL de diclorometano, adicionados em frações de 1 mL, sob fluxo de 1mL/min. As condições cromatográficas utilizadas foram: temperatura inicial da coluna ambiente, rampa de 45°C/min, depois 30°C/min até 130°C, depois 20°C/min até 300°C por 10 minutos. O tempo total de ensaio foi de 23

minutos. A temperatura do injetor foi de 260°C com divisor de fluxo de 12 mL/min, no modo de injeção com divisor de 10:1, com volume de injeção de 1 µL. Detector de massas com temperatura de linha de transferência de 280°C e fonte de íons de 230°C, e modo de varredura completa de 60-300.

#### 4.4.2 ENSAIOS DE RECUPERAÇÃO

Para os testes de recuperação foram dopadas duas amostras de água Mili-Q com os seguintes compostos a uma concentração de 460 ppb: Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)antraceno, Criseno, Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno, Dibenzo(a,h)antraceno, Benzo(g,h,i)pirileno, Indeno(1,2,3-cd)pireno e Benzo(b)fluoranteno.

---

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

### 5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física para as amostras de PEAD estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Características físicas das amostras utilizadas.

Geomembrana	Espessura (mm)	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	Densidade
PEAD 1.00 mm	0.98	1040	0.953
CV (%)	2.30	1.90	0.90

### 5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

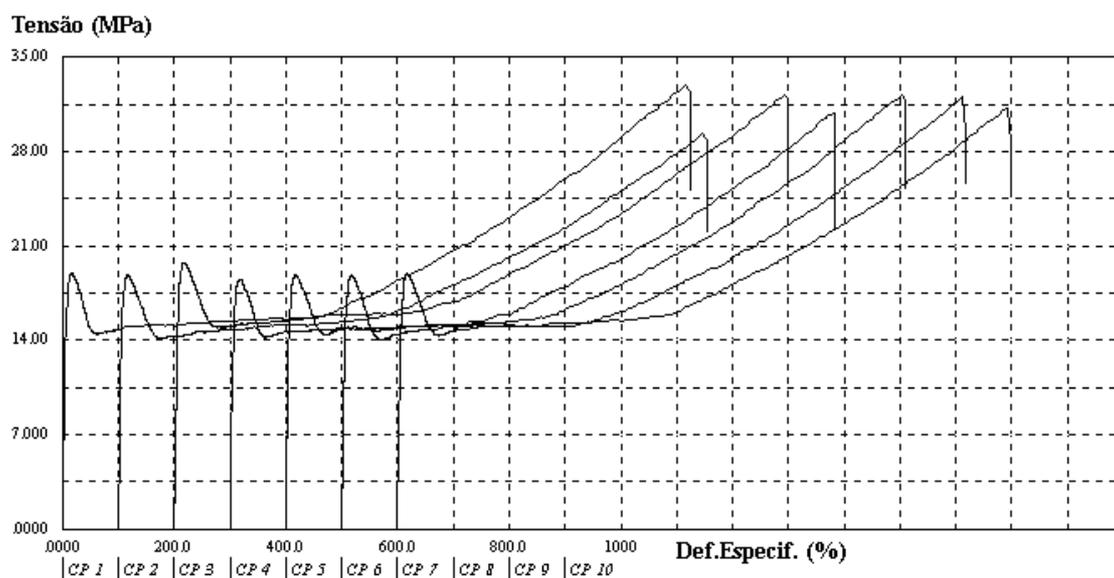
Os resultados obtidos para caracterização mecânica das geomembranas, ensaios de tração, estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de tração para as amostras intactas de HDPE nas direções longitudinal (L) e transversal (T) para o escoamento.

Geomembrana	F (N)	F/Larg (N/mm)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	E (Mpa)
PEAD 1.00 L	85	14	14	14	416
CV (%)	9,8	9,8	9,8	9,8	12,8
PEAD 1.00 T	90	15	15	14	460
CV (%)	10,4	10,4	10,4	10,4	9,5

A figura 5.1 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de tração nas amostras de PEAD. O gráfico ilustra a tensão aplicada pela deformação específica sofrida nas amostras de geomembranas intactas.

Figura 5.1. Resultados obtidos por meio do ensaio de tração em geomembranas de PEAD de espessura de 1,0mm.



**Observação:** Amostra virgem

Fonte: dados do próprio autor.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM GEOMEMBRANAS DE PEAD INTACTAS E COM IMPERFEIÇÕES APÓS DIFERENTES PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO

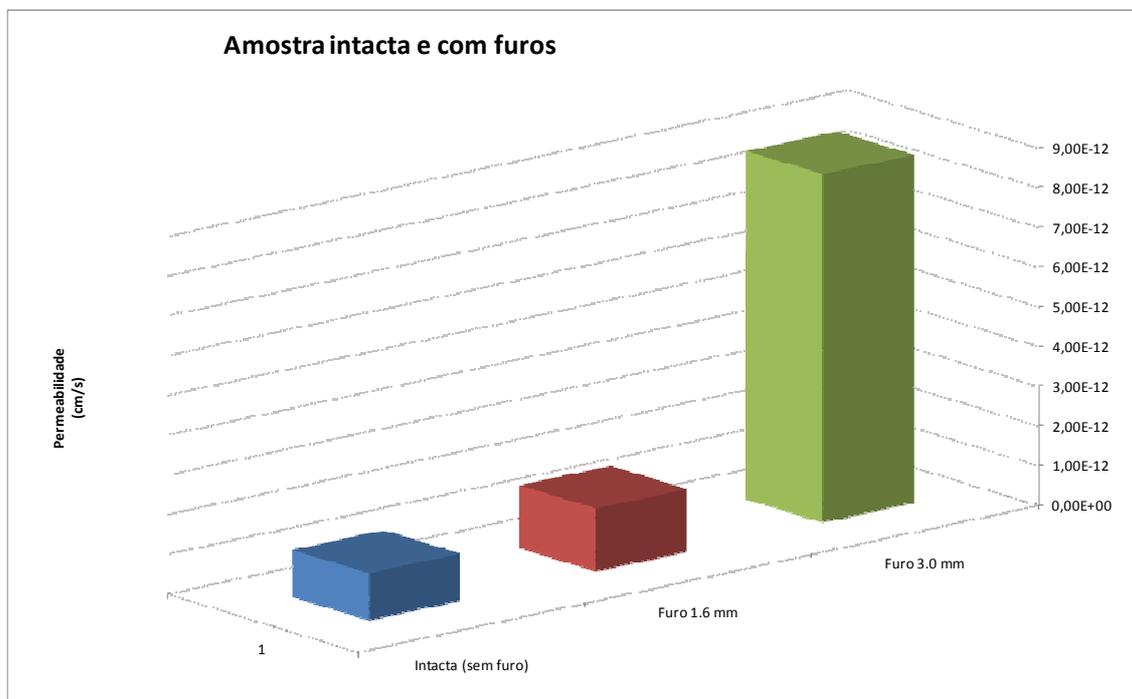
Os resultados obtidos pelo ensaio de permeabilidade em geomembranas são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3- Valores do coeficiente de permeabilidade à água para cada tipo de amostra.

<b>Amostra</b>	<b>Condição</b>	<b>k (cm/s)</b>
Virgem	sem furo	1,17E-12
	furo 1,6mm	1,57E-12
	furo 3,0mm	8,75E-12
Exposta à intempérie (12 anos)	sem furo	3,45E-12
	furo 1,6mm	4,66E-12
	furo 3,0mm	7,03E-12
Exposta ao calor em estufa (3 meses)	-	3,29E-11
Exposta ao calor em estufa (6 meses)	-	1,76E-11

A figura 5.2 apresenta a variação do coeficiente de permeabilidade à água nas amostras virgens sem furos e com imperfeições (furos de 1,6mm e 3,0mm).

Figura 5.2- Resultados obtidos para as amostras virgens.

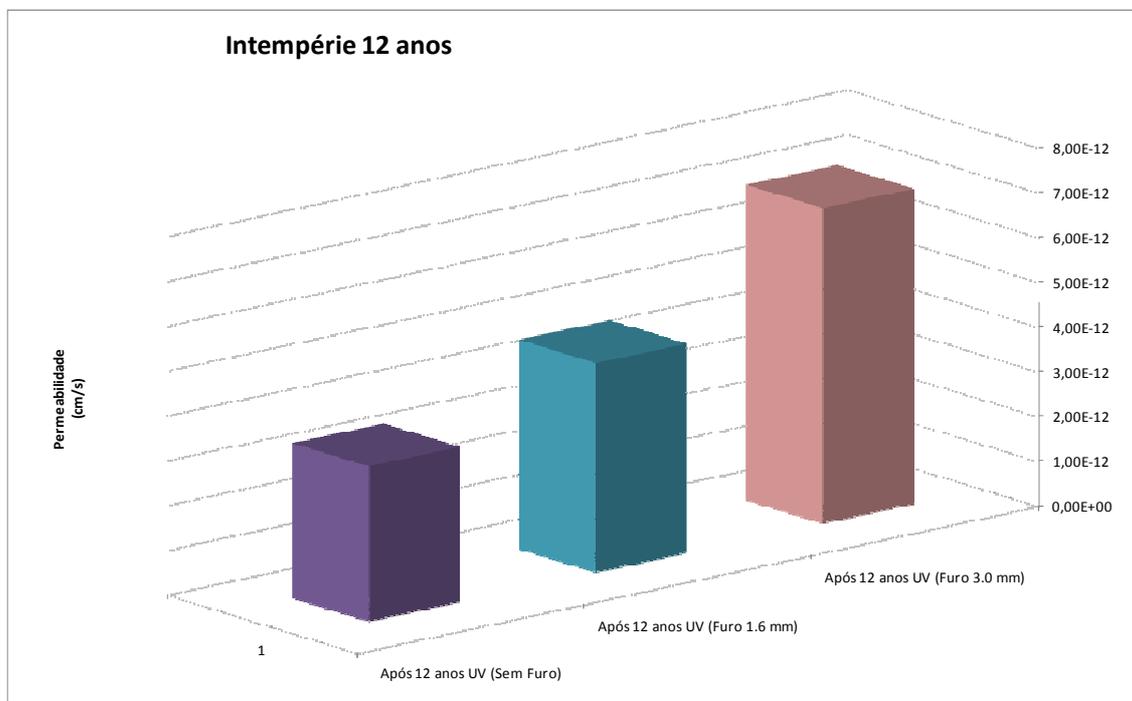


Fonte: o próprio autor.

Os resultados obtidos para a amostra virgem estão de acordo com os valores usuais da literatura, que correspondem a coeficiente de permeabilidade compreendidos entre  $1 \times 10^{-10}$  e  $1 \times 10^{-13}$  cm/s (GEROTO, 2008). Nota-se uma variação significativa entre os valores obtidos para as amostras intactas (sem furo) quando comparadas às com imperfeições (com furos), apresentando uma variação de aproximadamente 34% (aumento) para a membrana com furo de 1,6mm e aproximadamente 648% (aumento) para a membrana com furo de 3,0mm. Esse aumento significativo ressalta que as imperfeições nas geomembranas podem comprometer a função principal para qual foi projetada.

A figura 5.3 apresenta a variação do coeficiente de permeabilidade na amostra exposta à intempérie durante 12 anos intacta e com imperfeições (furos de 1,6mm e 3,0mm).

Figura 5.3 – Resultados obtidos para as amostra degradada pelos raios UV (intempérie).



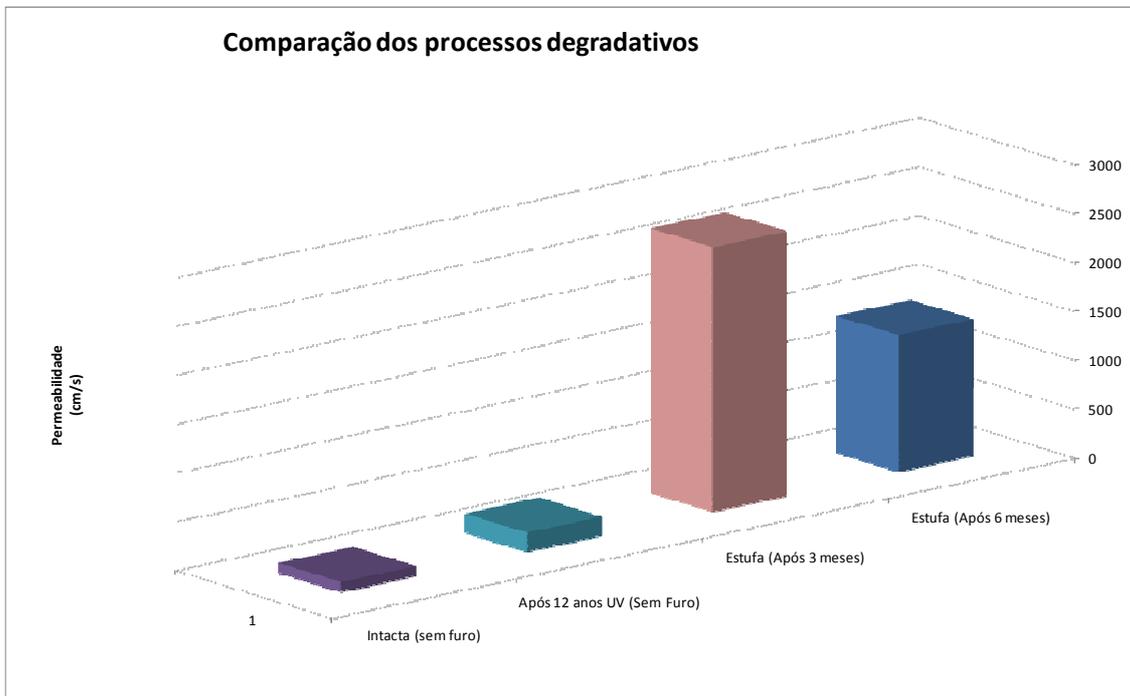
Fonte: o próprio autor.

Para as amostras após 12 anos em exposição aos raios UV observa-se também um aumento significativo entre os valores obtidos para as amostras intactas (sem furo) quando comparadas às com imperfeições (com furos), apresentam uma variação de aproximadamente 35% (aumento) para a membrana com furo de 1,6mm e aproximadamente 104% (aumento) para a membrana com furo de 3,0mm.

Comparando os resultados obtidos, nas amostras virgens e nas envelhecidas expostas aos raios UV, no que se refere à influencia dos furos, constata-se que é significativa em ambos os casos, ou seja, tanto para amostras envelhecidas quanto para amostras virgens, nota-se que as imperfeições afetam significativamente a função de impermeabilização das geomembranas. Nota-se ainda que os furos de 3,0mm apresentam um aumento maior no coeficiente de permeabilidade.

A figura 5.4 apresenta a comparação dos resultados em função do tipo de exposição para as amostras sem furos.

Figura 5.4 - Comparação dos valores obtidos em função do tipo de exposição para amostras sem furos.



Fonte: o próprio autor.

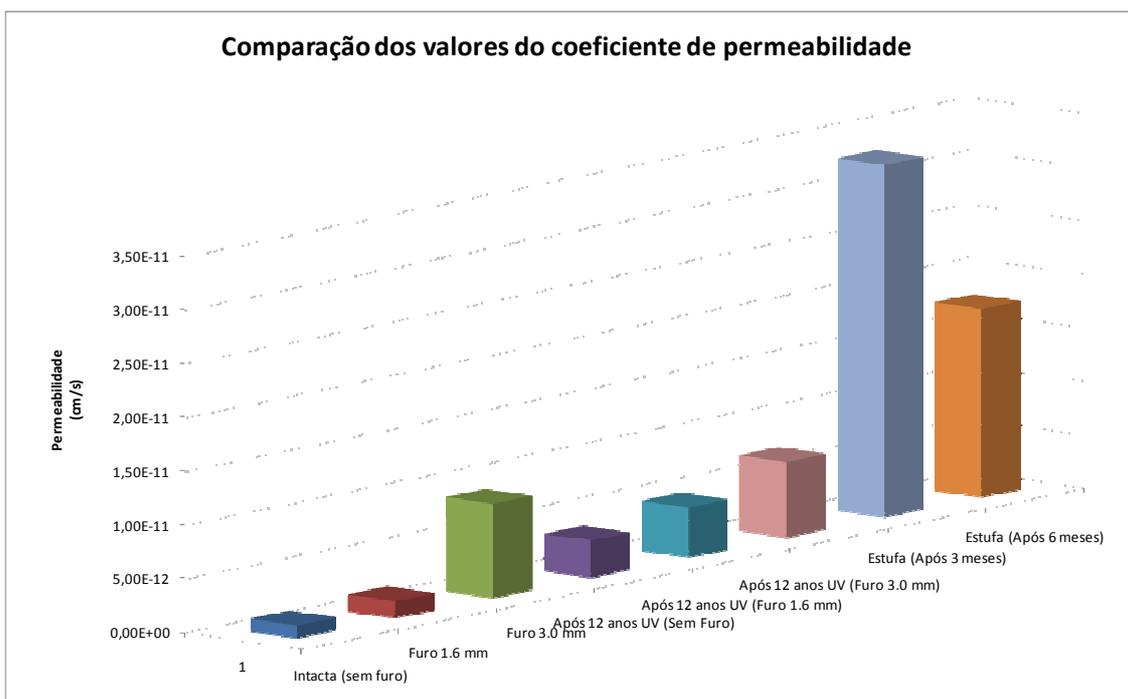
O gráfico faz uma análise em função do tipo de exposição para as amostras sem furos. Nesta é significativo o efeito do calor em estufa para as geomembranas, pois comparada às amostras intactas apresenta um aumento de 2706% no coeficiente de permeabilidade para as amostras expostas 3 meses e 1400% para amostras expostas 6 meses em estufa a 85°C. A tabela 5.4 apresenta resumidamente os valores de variações da permeabilidade tomando-se como referência as amostras virgens.

Tabela 5.4 - Análise comparativa para os processos de envelhecimento da geomembrana.

Amostra	Percentual de Variação
Virgem	-
Exposta à intempérie (12 anos)	195
Exposta ao calor em estufa (3 meses)	2706
Exposta ao calor em estufa (6 meses)	1400

A partir de todos os dados obtidos no projeto, a Figura 5.5 apresenta um resumo de todos os valores de coeficientes de permeabilidade.

Figura 5.5 - Comparação dos valores do coeficiente de permeabilidade.



Fonte: o próprio autor.

Observa-se que, comparativamente à amostra intacta, os processos de degradação tiveram influência sobre os valores de permeabilidade. Destes, o efeito do calor em estufa foi mais significativo. A indução dos furos aumentou os valores de permeabilidade. Interessante notar que um furo de 3,0 mm aumenta muito mais o valor da permeabilidade do que o envelhecimento aos raios UV por 12 anos nos três tipos de

amostras (sem imperfeições, com furo de 1,6mm e furo de 3,00mm). Além disso, observa-se que tanto para amostra virgem quanto para amostra exposta à intempérie, ambas apresentaram pouca variação no coeficiente de permeabilidade quando comparadas as condições sem furo e com furo de 1,6mm. Entretanto, quando essas amostras foram ensaiadas na condição de furo de 3,0mm, nota-se que ambas apresentaram variações mais significativas. Assim, pode-se constatar que até um furo de 1,6mm as geomembranas não sofrem tanta variação no coeficiente de permeabilidade, independentemente do tipo de amostra, mas quando o dano é dobrado, as variações passam a ser relativamente mais significativas.

No que se refere às amostras expostas ao calor em estufa, nota-se que os resultados são mais significativos para o período de tempo de 3 meses. Nesse sentido, pode ter ocorrido falhas durante o processo de vedação dos recipientes durante o ensaio, o que pode ter ocasionado a discrepância nos resultados, já que com o passar do tempo e com o efeito da temperatura, a geomembrana tende a se degradar e dilatar, esperando-se assim um aumento na variação no coeficiente de permeabilidade.

Apesar de todas essas variações, percebe-se que a ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade não se altera, ou seja, os valores permaneceram relativamente baixos e dentro dos valores usuais. No entanto, a pesquisa está focada em amostras pequenas de dimensões reduzidas. Se o problema for estendido para casos práticos de aplicação de geomembranas em campo, onde a presença de furos e defeitos é constante, percebe-se que o aumento do fluxo pode ser de grande monta podendo vir a prejudicar o desempenho do material. Em suma, tudo isso pode comprometer a obra como um todo uma vez que a função primária da geomembrana em uma obra civil ou ambiental é de atuar como camada impermeabilizante. Dessa forma, o controle de qualidade de instalação deve ser extremamente rigoroso.

#### 5.4 INFLUÊNCIA DE DEFEITOS (FUROS E MICROFUROS) NA PERMEABILIDADE DE GEOMEMBRANAS DE PEAD.

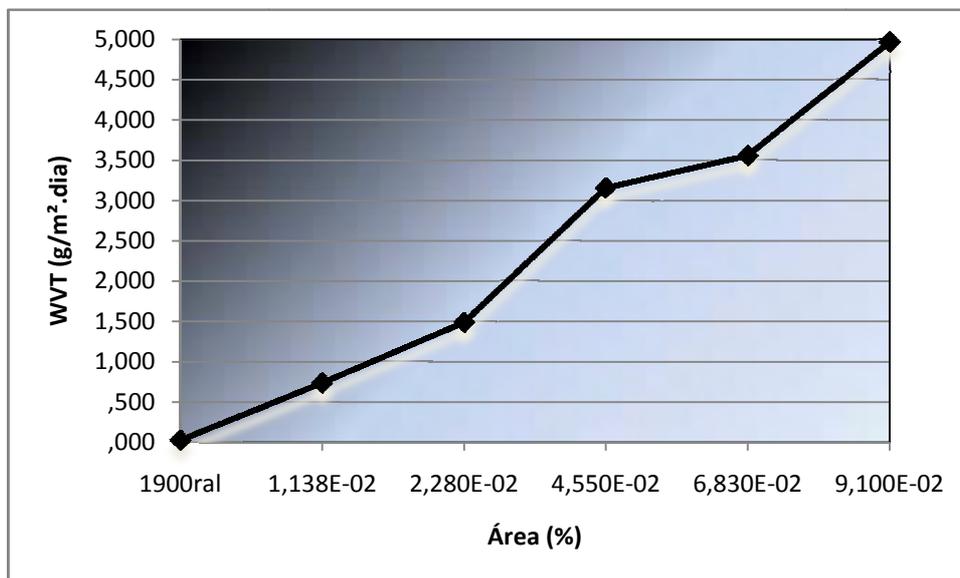
Na pesquisa, também foi analisada a influência do aumento induzido gradual de furos nas geomembranas, ou seja, procurou-se estudar o quanto a presença de mais de um micro furo afetaria os parâmetros de permeabilidade das geomembranas. Dessa forma, foi realizado o ensaio da razão de transmissão de vapor d'água em amostras com microfuros menores que 1mm (microfuro de 0,8mm) e em seguida com 2, 4, 6 e 8 microfuros de 0,8mm. A tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade de vapor d'água em amostras intactas e defeituosas.

Tabela 5.5 - Resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade de vapor d'água.

<b>Amostra</b>	<b>Área defeituosa (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>WVT (g/m<sup>2</sup>.dia)</b>	<b>Permeância (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Permeabilidade (cm/s)</b>
Intacta	0	0,02	$6,10 \cdot 10^{-11}$	$3,19 \cdot 10^{-12}$
1 microfuro	0,50	0,73	$2,60 \cdot 10^{-9}$	$4,66 \cdot 10^{-12}$
2 microfuros	1,00	1,48	$5,30 \cdot 10^{-9}$	$5,37 \cdot 10^{-12}$
4 microfuros	2,01	3,15	$1,13 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$
6 microfuros	3,02	3,55	$1,51 \cdot 10^{-8}$	$1,53 \cdot 10^{-11}$
8 microfuros	4,02	4,96	$2,11 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-11}$

Os gráficos a seguir, ilustram a variação dos parâmetros calculados pela porcentagem de área defeituosa. A Figura 5.6 ilustra a variação de WVT pela área defeituosa

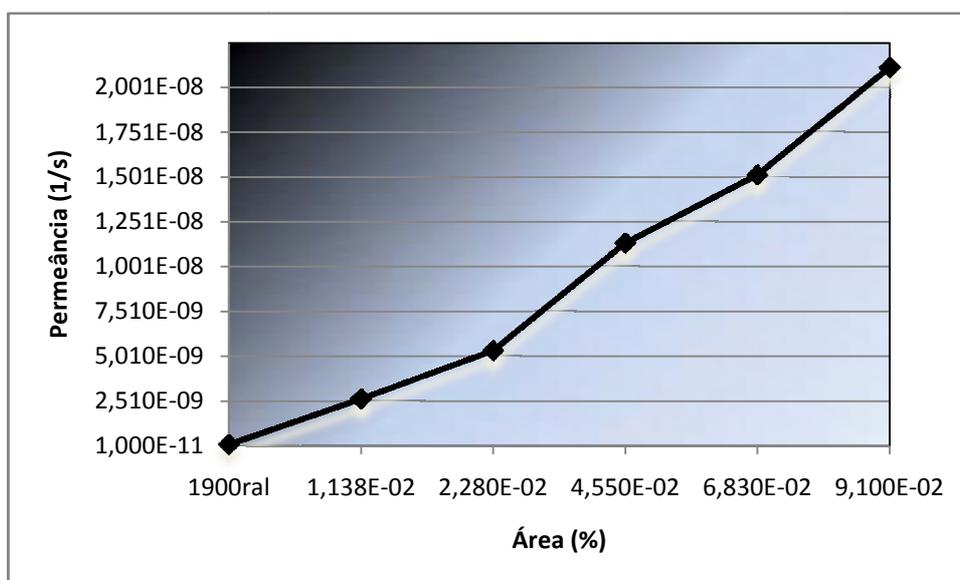
Figura 5.6 - Variação de WVT pela área defeituosa.



\*Área é a razão entre a área defeituosa (área do microfuro) e a área da amostra (44,18cm<sup>2</sup>), em porcentagem.

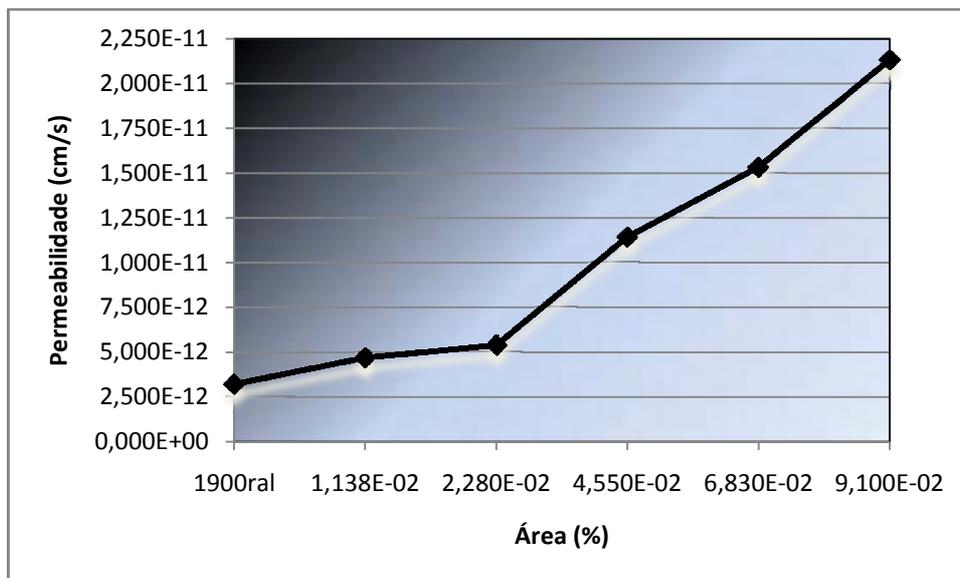
Fonte: o próprio autor.

Figura 5.7 - Variação de permeância pela área defeituosa.



Fonte: o próprio autor.

Figura 5.8 - Variação de permeabilidade pela área defeituosa.



Fonte: o próprio autor.

Nota-se que com o aumento da área defeituosa os parâmetros WVT, permeância e permeabilidade também aumentaram, configurando uma maior perda de massa de água ou solvente.

A norma estabelece que, para condições de boa qualidade, uma geomembrana pode apresentar 1 furo por acre ( $1,94 \cdot 10^{-8}\%$  da área), para condição de qualidade ruim, 10 furos ou mais por acre ( $1,94 \cdot 10^{-7}\%$  da área ou mais) e, para condições normais, pode apresentar 1 furo pequeno ( $3,1\text{mm}^2$ ).

## 5.5 ANÁLISE DA PERMEABILIDADE EM GEOMEMBRANAS DE PEAD AOS HIDROCARBONETOS

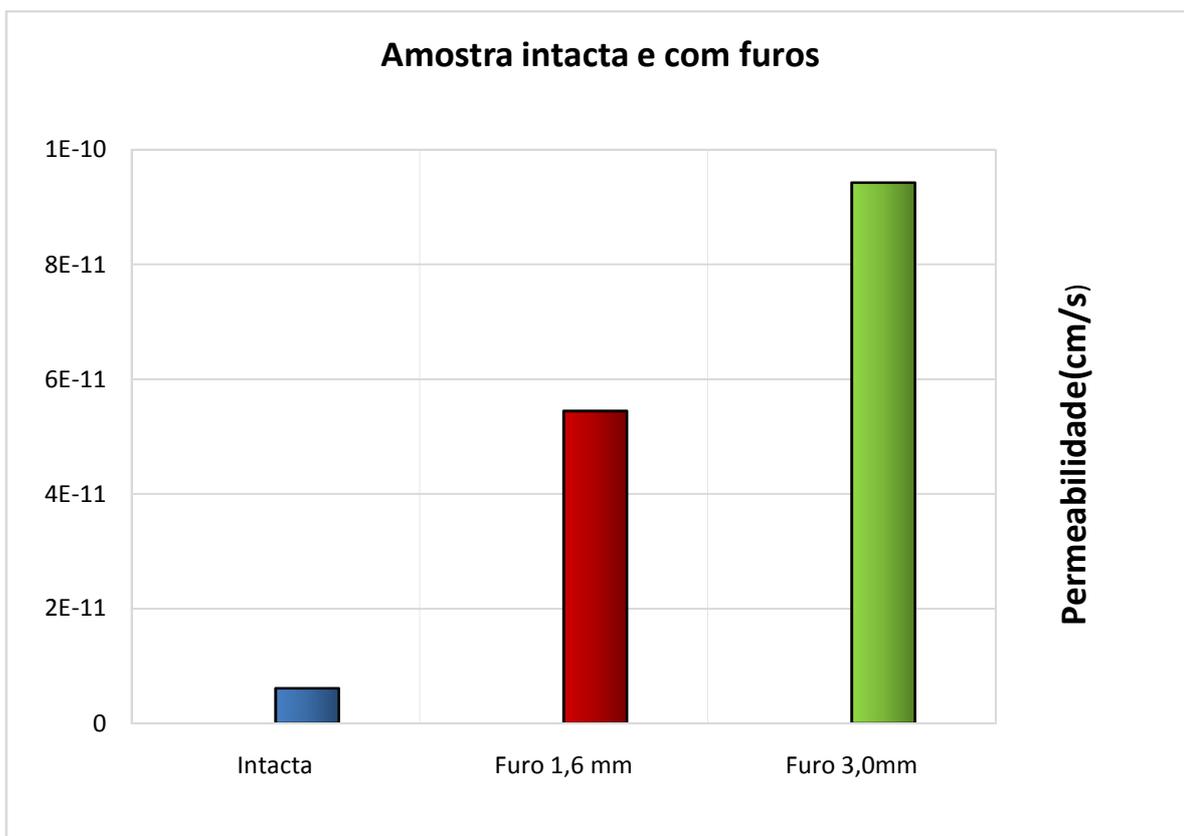
Além dos resultados apresentados acima, analisou-se a permeabilidade das geomembranas aos hidrocarbonetos. Os resultados dos ensaios de permeabilidade das geomembranas aos hidrocarbonetos são apresentados nas tabelas a seguir .

Tabela 5.6 – Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com álcool.

<b>Amostra</b>	<b>Condição</b>	<b>k (cm/s)</b>
Virgem (Álcool)	sem furo	6,15-12
	furo 1,6mm	5,45E-11
	furo 3,0mm	9,43-11

Com relação aos valores do coeficiente de permeabilidade para o ensaio com álcool, nota-se que para amostra com furo de 1,6mm ocorreu um aumento cerca de nove vezes maior do que para a amostra intacta. Já em relação à amostra com furo de 3,0mm observa-se que o aumento referente à amostra intacta é de cerca 15 vezes. Analisando ainda a variação do coeficiente de permeabilidade entre a amostra de 1,6 mm e a de 3,0 mm, tem-se um aumento de 1,73. No ensaio realizado para avaliação da permeabilidade ao álcool, em pequena escala, vê-se que um furo de 3,0mm pode ocasionar uma aumento significativo de 1500% no coeficiente de permeabilidade em relação à um amostra intacta, ressaltando-se a importância da ocorrência de danos nas geomembranas, os quais podem comprometer a função do geossintético para o qual foi projetado. O gráfico a seguir, ilustra a variação do coeficiente de permeabilidade para o ensaio com álcool.

Figura 5.9 - Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com álcool.



Fonte: o próprio autor.

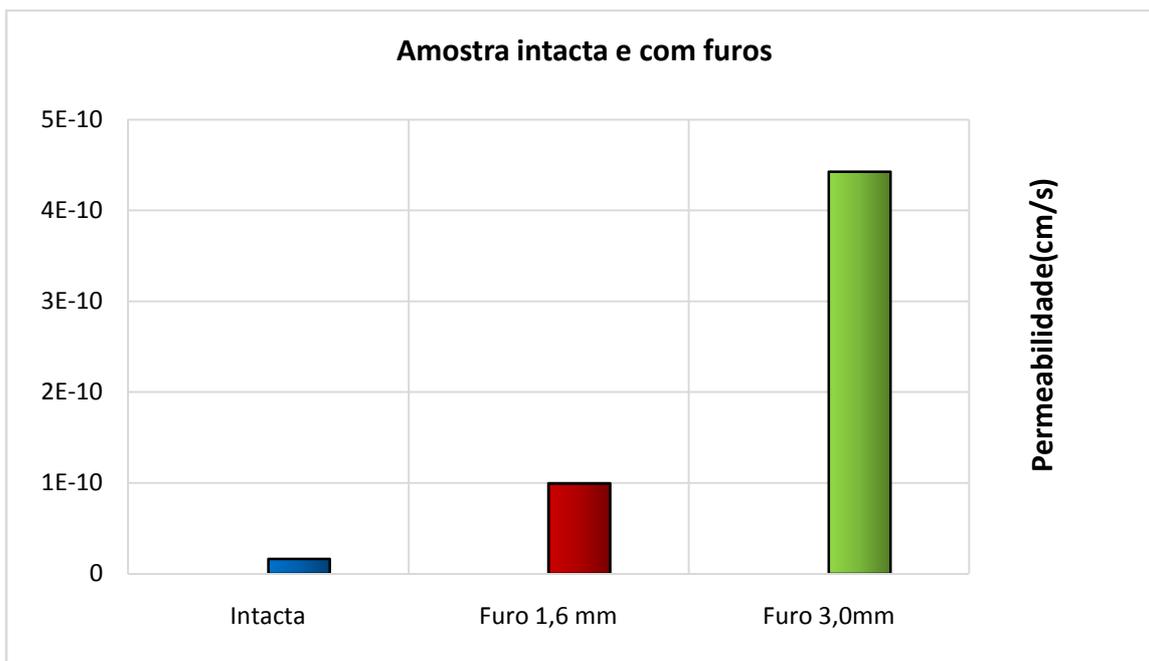
Tabela 5.7 – Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com gasolina.

<b>Amostra</b>	<b>Condição</b>	<b>k (cm/s)</b>
Virgem (Gasolina)	sem furo	1,63E-11
	furo 1,6mm	9,96-11
	furo 3,0mm	4,43E-10

Analisando os valores do coeficiente de permeabilidade para o ensaio com gasolina, nota-se que ocorreu também um aumento significativo. Em relação à amostra virgem, o coeficiente de permeabilidade para amostra com furo de 1,6mm é de cerca de 6 vezes maior. Já em relação à amostra com furo de 3,0mm a variação ainda é muito maior, cerca de 27 vezes. Analisando as amostras de 1,6mm e de 3,0mm, observa-se um aumento de cerca de 4,5 vezes no coeficiente de permeabilidade. Além disso, a amostra

virgem, apesar de não apresentar nenhuma imperfeição, apresentou um pequeno valor no coeficiente de permeabilidade, o que atesta para o fato de que as geomembranas não são totalmente impermeáveis. A grande variação em pequena escala do coeficiente de permeabilidade para amostras com furo, demonstra a importância de se atentar-se para imperfeições nas geomembranas. O gráfico a seguir, ilustra a situação apresentada.

Figura 5.10 - Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com gasolina.



Fonte: o próprio autor.

A tabela 5.8 a seguir, contém os resultados obtidos o ensaio de permeabilidade utilizando o óleo diesel.

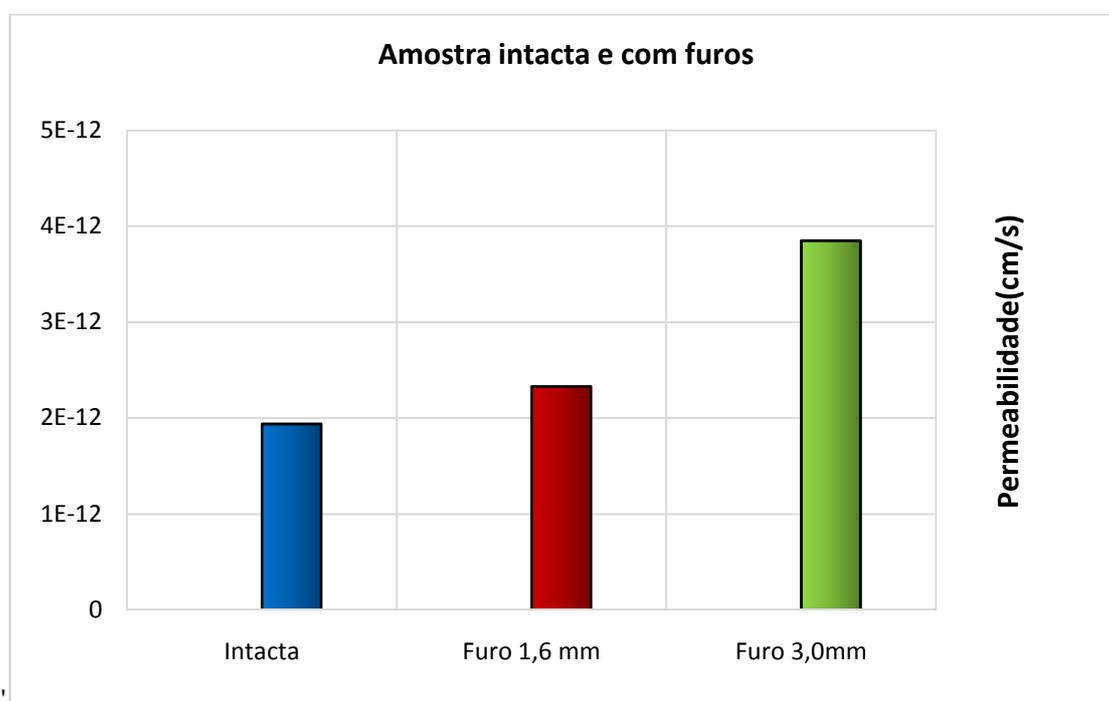
Tabela 5.8 – Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com óleo diesel.

<b>Amostra</b>	<b>Condição</b>	<b>k (cm/s)</b>
Virgem (Óleo diesel)	sem furo	1,94E-12
	furo 1,6mm	2,33E-12
	furo 3,0mm	3,85E-12

Observando os valores para o coeficiente de permeabilidade para ensaio com óleo diesel, constata-se que a variação não ocorreu de forma tão grande. Novamente, nota-se

que mesmo para amostra virgem, a geomembrana apresenta, embora muito baixo, um valor de  $1,94 \times 10^{-12}$  cm/s de coeficiente de permeabilidade. No que se refere á permeabilidade da amostra de 1,6mm ao óleo diesel, observa-se um valor de  $2,33 \times 10^{-12}$  cm/s, cerca de 1,2 vezes maior que o valor obtido para a amostra virgem. Já em relação à amostra com furo de 3,00mm, o valor do coeficiente de permeabilidade é de cerca de 2 vezes maior que para a amostra intacta. O aumento do coeficiente de permeabilidade da amostra de 1,6mm para a amostra de 3mm é de cerca de 1,65 . O gráfico a seguir ilustra os resultados obtidos.

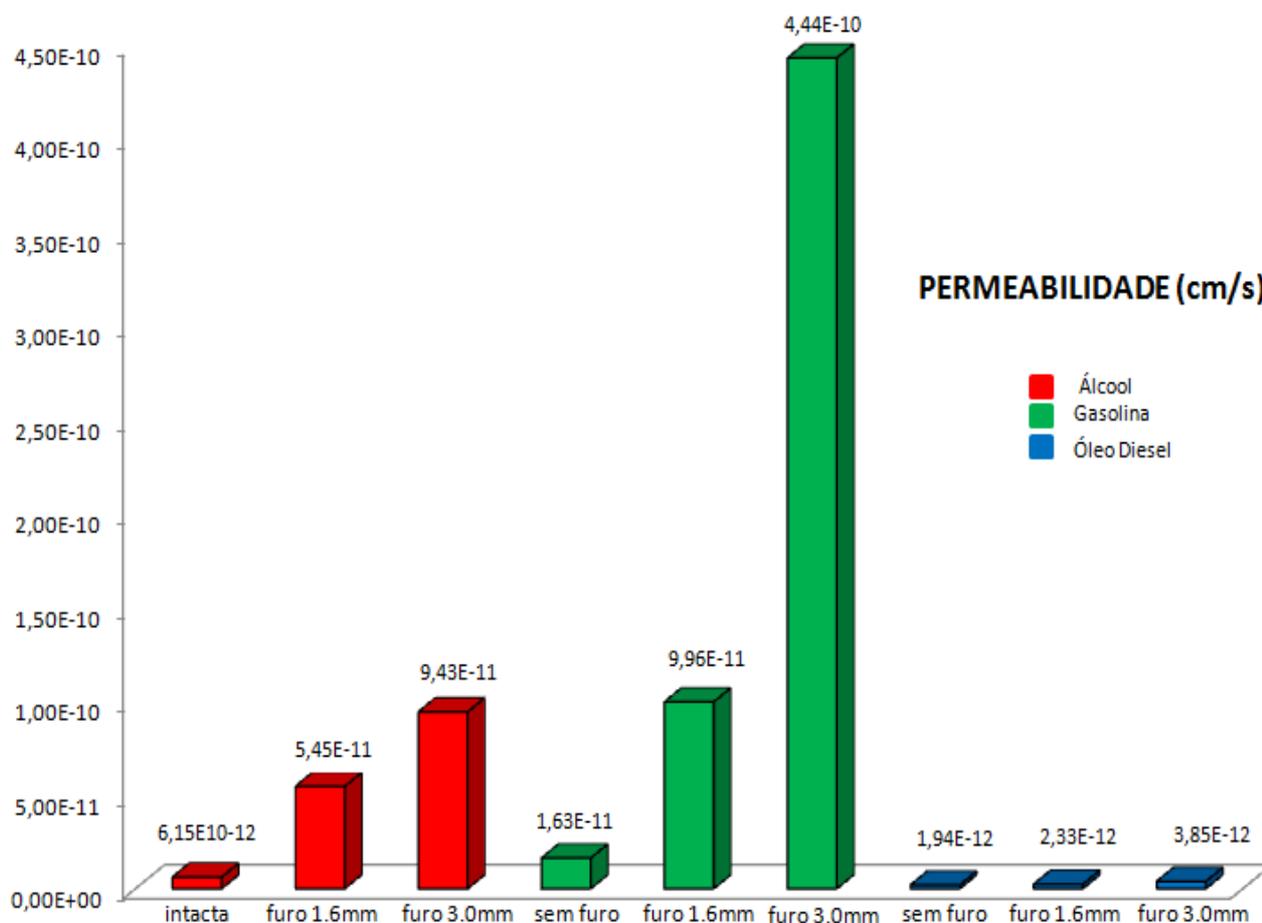
Figura 5.11 - Valores do coeficiente de permeabilidade para ensaio com óleo diesel.



Fonte: o próprio autor.

A partir dos dados obtidos na pesquisa com hidrocarbonetos, a Figura 5.12 ilustra resumidamente os resultados dos valores dos coeficientes de permeabilidade para os ensaios com álcool, gasolina e óleo diesel.

Figura 5.12 – Valores do coeficiente de permeabilidade para os ensaios com álcool, gasolina e óleo diesel.



Fonte: o próprio autor.

Na Figura 5.12 observa-se que, quando comparados isoladamente os resultados entre as amostras de álcool, gasolina e óleo diesel, intactas e com furos, as maiores variações no coeficiente de permeabilidade ocorreram nos ensaios com gasolina, seguido do álcool e óleo diesel. Nota-se, no ensaio com óleo diesel, que mesmo dobrando o dano na geomembrana, não ocorre variações significativas no coeficiente de permeabilidade, diferentemente dos ensaios com álcool e, sobretudo com gasolina, onde observa-se que dobrando o dano na geomembrana o coeficiente de permeabilidade quadruplica.

## 5.6 DIFUSÃO

Seguindo-se o método de Valentin (2008), para os ensaios de difusão dos contaminantes foram feitos preliminarmente os testes de recuperação para os seguintes HPAs: Naftaleno, Acenaftileno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Antraceno, Fluoranteno, Pireno, Benzo(a)antraceno, Criseno, Benzo(k)fluoranteno, Benzo(a)pireno, Dibenzo(a,h)antraceno, Benzo(g,h,i)pirileno, Indeno(1,2,3-cd)pireno e Benzo(b)fluoranteno. Esses HPAs foram utilizados para posteriormente ter-se uma ordem de grandeza dos resultados obtidos por Valentin (2008).

A Tabela 5.9 apresenta de forma sintetizada, os compostos e as concentrações encontradas no solo contaminado com óleo diesel comercial. O óleo diesel foi adicionado na fase do permeâmetro a uma concentração de 5000 g/L, (700 g de solo por 140 mL) para o teste de difusão dos compostos através da geomembrana.

Tabela 5.9 - Compostos e concentrações encontradas no solo contaminado com óleo diesel.

Concentrações (mg/kg)				
Naftaleno	Fluoreno	Antraceno	Pireno	Criseno
12,170	1,127	4,734	0,610	0,121

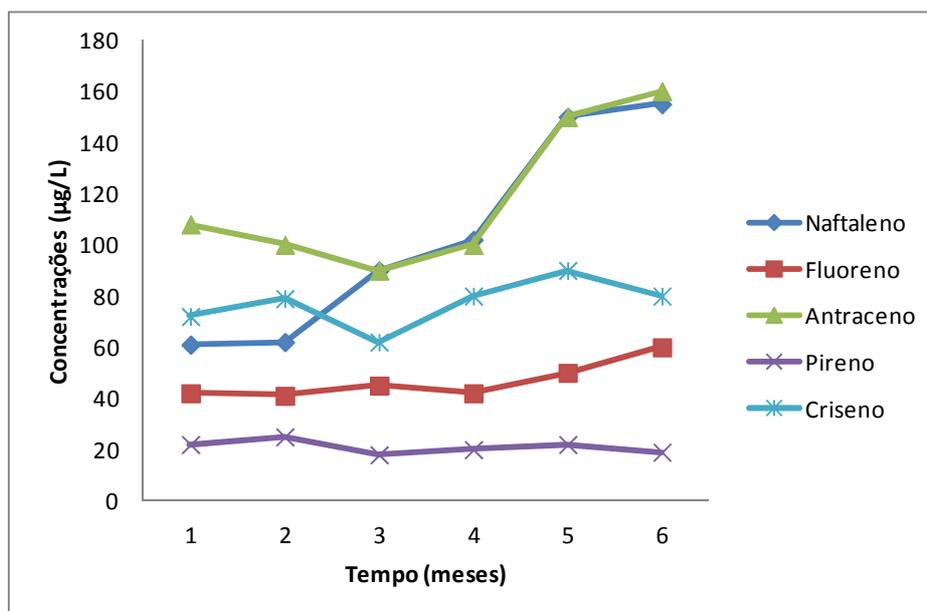
Finalmente, foram realizados os testes em seis coletas de amostras de água da parte isenta de contaminantes do permeâmetro, para as análises qualitativas e quantitativas, de cada composto da Tabela 5.10, em cada período de amostragem. Os cinco compostos foram identificados e quantificados como mostra na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Compostos e concentrações encontradas em cada período de análise.

Compostos	Concentrações ( $\mu\text{g/L}$ )					
	1 mês	2 meses	3 meses	4 meses	5 meses	6 meses
Naftaleno	61	62	90	102	150	155
Fluoreno	42	41	45	42	50	60
Antraceno	108	100	90	100	150	160
Pireno	22	25	18	20	22	19
Criseno	72	79	62	80	90	80

A Figura 5.13 ilustra as curvas de porcentagem em função do tempo para os cinco compostos.

Figura 5.13 - Curvas da concentração de cada composto presente na água pela análise da difusão.



Fonte: o próprio autor.

Analisando-se as curvas da Figura 5.13, percebe-se que em geral os compostos permeiam pela geomembrana em função do tempo. Percebe-se que ao final de 6 meses a maior concentração encontrada na água foi a do antraceno seguida do naftaleno. Esses valores são relativamente baixos mostrando que a geomembrana atuou como barreira isolante a esses compostos, tendo em vista a alta concentração na fase contaminada. Esses resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Valentin (2008).

De forma geral, observa-se que a indução dos furos aumentou os valores de permeabilidade. Além disso, conclui-se que dependendo da dimensão do furo, a influência dos danos nas geomembranas é mais significativa do que o próprio efeito da exposição à intempérie provocada no decorrer do tempo. Isso pode ser constatado na medida em que um furo de 3,0 mm em uma amostra virgem aumentou muito mais o valor do coeficiente de permeabilidade do que em uma amostra sem furo exposta ao envelhecimento pelos raios UV por 12 anos. Em estudo sobre os aspectos de degradação das geomembranas de PEAD, Lodi (2003) concluiu que os efeitos da intempérie aumentam a deformabilidade das geomembranas e a exposição à radiação UV faz com as geomembranas de PEAD tornem-se um pouco mais dúcteis. Entretanto, conclui-se que apesar de alteradas as propriedades das amostras, a ocorrência de danos (furos) afetou mais a permeabilidade em amostras virgens do que em amostras expostas a intempérie e radiação UV. Talvez isso ocorra pela indução de ligação cruzada ou do fechamento de cadeias poliméricas que devem ser melhor estudados.

Apesar das variações obtidas nos resultados, percebe-se que a ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade não se altera, ou seja, os valores permaneceram relativamente baixos e dentro dos valores usuais (coeficiente de permeabilidade compreendido entre  $1 \times 10^{-10}$  e  $1 \times 10^{-13}$  cm/s). Entretanto, não se pode considerar que as geomembranas são materiais totalmente impermeáveis.

Em relação à permeabilidade aos hidrocarbonetos, nota-se que tanto as amostras intactas quanto as com furos de 1,6mm e 3,00mm apresentaram maior coeficiente de permeabilidade à gasolina, seguido do álcool depois do óleo diesel. Isso se deve à volatilidade, que se refere a uma grandeza que está relacionada à facilidade da substância de passar do estado líquido ao estado de vapor.

Acrescenta-se ainda o fato de que quanto maior o dano (furo) ocasionado ao geossintético, maior sua variação no coeficiente de permeabilidade e quanto maior a indução de furos maior também é a variação do coeficiente de permeabilidade, conforme os resultados obtidos.

Por meio da pesquisa, foi possível avaliar e quantificar as perdas que ocorrem nas geomembranas em diversas condições, permitindo a comparação de valores obtidos por meio de ensaio rápido (realizado com baixas pressões), diferentemente dos ensaios convencionais de permeabilidade, que utilizam valores elevados de pressão (que dificilmente ocorrem em campo).

Em suma, pode se afirmar que os ensaios de permeabilidade contribuíram para análise do comportamento das geomembranas de PEAD aos diferentes tipos de situações, no entanto a possibilidade de se estender esses resultados para possíveis previsões em situações corriqueiras em obras é mais complicada. Isso porque em situações de campo existe uma complexidade muito maior de solicitações atuantes sobre os materiais.

No ensaio de difusão, a técnica de cromatografia gasosa mostrou-se eficiente para detectar os compostos que difundiram pela geomembrana em função do tempo. Deve-se levar em conta que geomembranas de PEAD são permeoseletivas e, de acordo com os resultados, tendem a permear mais certos compostos em detrimento de outros. Dessa forma, verifica-se com os dados analisados e com a literatura corrente que é recomendável proteger a geomembrana com uma camada sintética ou natural bem como controlar os procedimentos de campo de forma a evitar o tráfego de pessoal e de equipamentos sobre a geomembrana descoberta. Esses procedimentos irão minimizar possíveis danos no corpo da geomembrana bem como evitar a fuga por processo difusivo de eventuais gases e/ou vapores.

Em suma, pode se afirmar que os ensaios de permeabilidade contribuíram para análise do comportamento das geomembranas de PEAD aos diferentes tipos de situações, no entanto não há possibilidade de se estender esses resultados para possíveis previsões em situações corriqueiras em obras. Isso porque em situações de campo existe uma complexidade muito maior de solicitações atuantes sobre os materiais.

Finalmente, ressalta-se que os resultados obtidos forneceram informações importantes para o estudo da permeabilidade e difusão das geomembranas de PEAD em diferentes tipos de situações.

## 6. CONCLUSÃO

---

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que:

- A indução dos furos aumentou os valores de permeabilidade;
- A influência dos danos nas geomembranas foi mais significativa do que o próprio efeito da exposição à intempérie provocada no decorrer do tempo. Furos de 3,0 mm em uma amostra virgem aumentaram muito mais o valor do coeficiente de permeabilidade do que em uma amostra sem furo exposta ao envelhecimento pelos raios UV por 12 anos;
- A ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade não se alterou. Os valores permaneceram relativamente baixos e dentro dos valores usuais;
- As amostras intactas como as com furos de 1,6 mm e 3,00 mm apresentaram maior coeficiente de permeabilidade à gasolina, seguido do álcool depois do óleo diesel;
- Quanto maior o dano (furo) ocasionado ao geossintético, maior foi sua variação no coeficiente de permeabilidade e quanto maior a indução de furos maior também foi a variação do coeficiente de permeabilidade;
- O método utilizado na avaliação do processo difusivo solo contaminado/geomembrana foi eficaz para se detectar as variações ocorridas e,
- A técnica de cromatografia gasosa mostrou-se eficiente para detectar os compostos que difundiram pela geomembrana em função do tempo.

## 7. REFERÊNCIAS

---

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12568**: geossintéticos – determinação de massa por unidade de área. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553**: geossintéticos – terminologia. Rio de Janeiro, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 573**: standard test method for rubber – deterioration in on dir oven. Philadelphia, 1981.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D668**: standard test method for tensile properties of plastics. Philadelphia, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D792**: standard test methods for specific gravity and density of plastics by displacement. Philadelphia, 1979.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1435**: standard practice of outdoor weathering of plastics. Philadelphia, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4364**: standard practices for performing outdoor accelerated weathering tests of plastics using concentrated sunlight. Philadelphia, 2002
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4439**: standard terminology for geosynthetics. Philadelphia, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5199**: measuring nominal thickness of geotextiles and geomembranes. Philadelphia, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6693**: standard test method for determining tensile properties of nonreinforced polyethylene and nonreinforced flexible polypropylene geomembranes. Philadelphia, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E96**: standard test methods for water vapor transmission of materials. Philadelphia, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G26**: practice for operation light exposure apparatus (xenon-arc type) with and without water for exposure of nonmetallic materials. Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G53**: practice for operation light and water-exposure apparatus (fluorescent uv condensation type) for exposure of nonmetallic of nonmetallic materials. Philadelphia, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM ISSO 10318**: terms and definitions. Philadelphia, 2005.

BATHURST, R.J. **Geosynthetics clasification**. St. Paul: IFAI, 2007. Disponível em: <[www.geosyntheticssociety.org](http://www.geosyntheticssociety.org)>. Acesso em: 18 Mar. 2011.

BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J.; ADAM, D. Geosynthetics in waste containments: recent advances. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice. **Proceedings...** Nice: A. A Balkema, 2002. v. 2, p. 445-507.

BUENO, B. S. Propriedades, especificações e ensaios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABMS, 2003. p.163-176.

BRAITHWAITE, A.; SMITH, F. J. **Chromatographic methods**. 5. ed. London: Blackie, 1999. p. 6-7

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO – CEN. **Geotextiles and geotextile – related products – static puncture test (CBR-Test)**: EN ISO 12236. Brussels: [s.n.], 1996. 5 p.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO – CEN. **Geotessili e prodotti affini – determinazione dela massa areica**: EN 965. Brussels: [s.n.], 1997. 6 p.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO - CEN. **flexible sheets for waterproofing – determination of dimensional stability – part 2: plastic and rubber sheets for roof waterproofing**: prEN 1107-2. Brussels: [s.n.], 2000. 5 p.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO - CEN. **Geosynthetics – determination of the friction characteristics – part : direct shear test.** prEN ISO12957-1, Brussels: [s.n.], 2000. 1 p.

COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO – CEN. **Geosynthetics – determination of burst strength:** prEN 14151. Brussels: [s.n.], 2001. 9 p.

COLMANETTI, J.P. **Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face montante de barragens de enrocamento.** 2006. 273 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

COLLUCI, P.; LAVAGNOLO, M.C. Three years field experience in electrical control of synthetic landfills liners. In: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 5., 2001, Sardinia. **Proceedings...** Sardinia: Cagliari: [s.n.], 2001. v.2, p. 437-452.

DAVIS, R.; FREARSON, M. **Mass spectrometry.** Chichester: Wiley, 1987. 2 p.

DARILEK, G. T.; LAINE D.; PARRA, J. O. The Electrical leak location method for geomembrane liners. In: GEOSYNTHETICS, 89., 1989, San Diego. **Proceedings ...** San Diego: IFAI, 1989. v. 2, p. 456-462.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Uni 4916:** prove su elastomeri e materie plastiche - determinazione della durezza shore A e D. Milão: [s.n.], 1974. 4 p.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Uni 8202/15:** membrane per impermeabilizzazione – determinazione della flessibilità a freddo. Milão: [s.n.], 1984. 2 p.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Uni 8202/12:** membrane per impermeabilizzazione – determinazione della resistenza al punzonamento dinamico. Milão: [s.n.], 1988. 3 p.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **Uni 8202/6:** membrane per impermeabilizzazione – determinazione dello spessore. Milão: [s.n.], 1989. 5 p.

FOOSE, G.J.; BENSON; C.H.; EDIL, T.C. Predicting leakage through composite landfill liners. **ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, San Diego, v. 127, n. 6, p. 510-520, 2001.

GIROUD, J. P. Impermeability: the myth and a rational approach. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMEMBRANES, 3., 1984, St Paul. **Proceedings ...** St Paul: Industrial Fabrics Association International, 1984. p. 163-168.

GEROTO, R. E. **Desempenho de camadas de proteção para geomembranas**. 2008. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GIROUD, J. P. Equations for calculating the rate of liquid migration though composite liners due to geomembrane defects. **Geosynthetics International**, St. Paul, v. 3, n. 3-4. p. 335-348, 1997.

GIROUD, J. P.; SODERMAN, K. L.; KHIRE, M. V.; BADU-TWENEBOAH, K. New developments. In: CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS - IGS, 6., 1998, St Paul. **Conference...** Denver: Colorado, 1998. p. 261-268.

GIROUD, J. P; TOUZE-FOLTZ, N. Geomembranes for landfills. **Geosynthetics International**, Atlanta, v. 10, n. 4, p. 124-133.

GROB, R. L.; BARRY, E. F. **Modern practice of gas chromatography**. 4. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004. 26 p.

HAXO JUNIOR, H. E.; PIERSON, P. **Identification and performance testing of seam strength – geotextiles and geomembranes**. Great Britain: Chapman and Hall, 1991. 240 p.

HSHUAN, Y.G., LORD Jr., A. E., KOERNER, R. M. Effects of outdoor exposure on high density polyethylene geomembrane. In: GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 91. 1991, Atlanta. **Proceedings ...** Atlanta: IFIA, 1991. p. 287-302.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iso 868:** plastics and ebonite – determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore Hardness). Geneva: [s.n.], 1985. 5 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iso 6427:** plastics – determination of matter extractable by organic solvents. Geneva: [s.n.], 1992. 9 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iso 2578:** plastics – determination of time-temperature limits after prolonged exposure of heat. Geneva: [s.n.], 1993. 14 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iso 34-1:** rubber, vulcanized or thermoplastic – determination of tear strength. Geneva: [s.n.], 1994. 11 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iso 11346:** rubber, vulcanized or thermoplastic – estimation of life-time and maximum temperature of use from an Arrhenius plot. Geneva: [s.n.], 1997. 5 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Iso 188:** rubber, vulcanized or thermoplastic – Accelerated ageing and heat resistance tests. Geneva: [s.n.], 1998. 9 p.

KOERNER, G. R.; KOERNER, R.M. Temperature behavior of field deployed HDPE geomembranes. In: GEOSYNTHETICS, 95, 1995, Nashville.  
**Proceedings...**Nashville: IFIA, 1995. p. 921-937.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics.** 3rd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1998. p. 426 - 469.

LAINE, D. L. Analysis of pin hole seam leak located in geomembrane liners using electrical leak location method. In: GEOSYNTHETICS, 91., 1991, Atlanta.  
**Proceedings...** Atlanta: IFIA, 1991. p. 239-253.

LANÇAS, F. M. **Cromatografia em fase gasosa.** São Carlos: Acta, 1993. p. 80-81.

LODI, P. C. **Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e poli cloreto de vinila (PVC).** 2003. 284 f. Tese

(Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2003.

MCNAIR, H. M.; MILLER, J. M. **Basic gas chromatography**: techniques in analytical chemistry. New York: Chichester, 1997. 12 p.

MCMMASTER, M. **C.GC/MS - a practical user's guide**. New York: Wiley, 1998. 184 p.

NOSKO, V.; ANDREZAL, T.; GREGOR, T.; GANIER, P. Sensor Damage Protection Damage Detection System (DDS) – the unique geomembrane test method. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE – EUROGEO, 1., 1996, Maastricht. **Proceedings...** Maastricht: IFAI, 1996. p.743-748.

NOSKO, V.; TOUZE-FOLTZ, N. Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer. In: EUROPEAN CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2., 2000. Bologna. **Proceedings...** Bologna: IFAI, 2000. v. 2, p. 557-560.

PEGGS, I.D. Three challenging electrical integrity/leak surveys on uncovered and deep water-covered liners. In: GEOSYNTHETICS, 3., 2001, Portland. **Proceedings...** Portland: IFAI, 2001. v. 1, p.245-262.

QUEIROZ, P. I. B. **Um método numérico para análise de adensamento e transporte de contaminantes no solo**. 2002. 166 f. Tese (doutorado)- Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, 2002.

ROLLIN, A.; RINGO, J. M. **Geomembranes – Identification and Performance Testing**. Great Britain: Chapman and Hall, 1991. 277p.

ROLLIN, A. L.; MARCOTTE, M.; CHAPUT, L. Leak location in exposed geomembrane liners using an electrical leak detection technique. In: GEOSYNTHETICS, 5., 1999. Boston. **Proceedings...** Boston: IFAI, 2002. v. 2, p. 615-626.

ROLLIN, A. L.; MARCOTTE, M.; CHAPUT, L. Lessons learned from Geo-Electrical Leaks Surveys. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002. Nice. **Proceedins...**Nice: IFAI, 2002. v. 2, p. 527-530.

ROWE, R. K. Geosynthetics and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste. In: CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., 1998, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: Rowe, 1998. v. 1, p. 27 – 102.

SHARMA, H. D.; LEWIS, S. P. **Waste containment system, waste stabilization and landfills: design and evaluation.** New York: John Wiley & Sons, 1994. 588 p.

SUITS, L. D.; HSUAN, Y. G. Assessing the photo degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer. **Geotextiles and Geomembranes.** Amsterdam, v. 21, n. 2, p. 111-112, 2003.

TOUZE-FOLTS, N., LUPO, J.; BARROSO, M. Geoenvironmental applications of geosynthetics. Keynote lecture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS – EUROGEO, 4., 2008, Edinburgh. **Proceedings ...** Edinburgh: Elsevier, 2008. p. 98.

VALENTIN, C. A. **Estudo da degradação de geomembrana de polietileno de alta densidade de 2,5 mm de espessura frente à gasolina, óleo diesel e álcool combustível.** 2008. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

VAN SANTVOORT, G. **Geotextiles and geomembranes in civil engineering.** Rotterdam: A. A. Balkema, 1994. p. 517-518.

VIDAL, D. Propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos. In: CURSO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA E MEIO AMBIENTE, 3., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto de Engenharia, 1998. p. 32

ZANZINGER, H.; GARTUNG, E. Landfills. In: SHUKLA, S. K. (Ed.). **Geosynthetics and their applications.** London: Published by Thomas Telford Publishing, 2002. p. 259-279. ISBN 0 7277 3117 3.