**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**ASPECTOS DE DEGRADAÇÃO DE GEOMEMBRANAS
POLIMÉRICAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE
(PEAD) E DE POLI (CLORETO DE VINILA) (PVC)**

Paulo César Lodi

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Geotecnia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

São Carlos

2003

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO CÉSAR LODI**

Tese defendida e julgada em 25-08-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **BENEDITO DE SOUZA BUENO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Tit. **ORENCIO MONJE VILAR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

INDIARA GIUGNI VIDAL
(Especialista – Nortene Plásticos Ltda.)

Aprovado

Prof. Dr. **ELIAS HAGE JÚNIOR**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. **FÁBIO CEZAR FERREIRA**
(UNESP/Campus de Presidente Prudente)

Aprovado

Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Prof. Assoc. **MARIA DO CARMO CALLJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

***“Aos entes queridos pelo amparo constante e à
Rejane pelo carinho e pelo
amor sempre presentes.”***

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno pela orientação e amizade.

Ao Prof. Dr. Orencio Monje Vilar pela amizade e esclarecimentos.

Aos meus amigos da Geotecnia, Ana Paula, Sandra, Ana Carina, Jeselay, Rogério, Gracinete, Jocy, Kleber, Leo, Paulo Maurício, Jânio, Domingos, Karla, Débora, Júlio, Ricardo, Daniele, Silvana, Gilvana, Nívea, Maurício, Miguel e outros tantos que passaram pelo departamento.

Em particular, aos amigos do Geossintéticos, Carina, Yuri, Érika Sá, Érika Motta, Márcio, Paulo Márcio, Sidney, Leo e pela amizade e companheirismo.

Aos técnicos do Geossintéticos Silvio e Clever pela amizade e constante auxílio.

Aos meus amigos camaradas Vinicius (guaxi) e Luiz Baraz pela amizade sincera.

Ao meu amigo Marcus Vinicius pela amizade, apoio e ajuda ao longo da pesquisa.

Aos técnicos José Luiz e Oscar pela amizade e companheirismo.

À Engenheira Msc. Irahya S. Maia pela amizade e pelo auxílio na realização dos ensaios e equipamentos.

Aos funcionários da Geotecnia: Maristela, Álvaro, Neiva, Toninho, Antônio, Décio e Benedito pela amizade e respeito.

Ao Dr. Herivelto Moreira pela amizade, apoio e prestimosa dedicação sempre presentes.

A todos os docentes da Geotecnia pela amizade e bons momentos desfrutados.

Ao Prof. Dr. José Antônio Malmonge pela amizade e constante incentivo na realização da pesquisa.

Aos Professores Dr. Aldo Job e Dr. Fábio César do Departamento de Física da Unesp de Presidente Prudente pelo apoio e ajuda na realização dos ensaios.

Aos Professores Dr. José M. Agnelli e Dr. Elias Hage pelos esclarecimentos e pela ajuda na realização dos ensaios no Dema/UFSCar.

Ao técnico Lourival do Dema pela amizade e o apoio na realização dos ensaios.

Ao Departamento de Engenharia Civil da FEIS/UNESP pelo apoio na realização da pesquisa e do projeto de Doutorado.

Aos Professores Dr. José A. de Lollo, Dr. Adriano Sousa, Dr. Dib Gebara e Dr. Milton D. Sobrinho pela amizade, auxílio e esclarecimentos.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil: Mário, Cavassano, Gilson, Silvio, Gilberto e Ronaldo pela ajuda e amizade.

Aos amigos Roger, Humberto, Fábio, Rômulo, Francisco e Saulo pela amizade e ajuda sempre presentes.

Às empresas Engepol S.A. e Sansuy do Brasil pela cooperação no fornecimento das amostras de geomembranas.

À Engenheira Msc. Indiara G. Vidal pelo apoio, amizade e esclarecimentos ao longo da pesquisa.

Ao CNPq e à reitoria da Unesp pelo apoio financeiro.

VENCERÁS

*Não desanimes.
Persiste mais um tanto.
Não cultives pessimismo.
Centraliza-te no bem a fazer.
Esquece as sugestões do medo destrutivo.
Segue adiante, mesmo varando a sombra dos próprios erros.
Avança ainda que seja por entre lágrimas.
Trabalha constantemente.
Edifica sempre.
Não consintas que o gelo do desencanto te entorpeça o coração.
Não impressione a dificuldade.
Convence-te de que a vitória espiritual é construção para o dia a dia.
Não desistas da paciência.
Não creias em realização sem esforço.
Silêncio para a injúria.
Olvido para o mal.
Perdão às ofensas.
Recorda que os agressores são doentes.
Não permitas que os irmãos desequilibrados te destruam o trabalho ou
te apaguem a esperança.
Não menospreze o dever que a consciência te impõe.
Se te enganaste em algum trecho do caminho, reajusta a própria visão e
procura rumo certo.
Não contes vantagens nem fracassos.
Estuda buscando aprender.
Não te voltes contra ninguém.
Não dramatizes provocações ou problemas.
Conserva o hábito da oração para que se te faça luz na vida íntima.
Resguarda-te em Deus, persevera no trabalho que Deus te confiou.
Ama sempre, fazendo pelos outros o melhor que possas realizar.
Age auxiliando. Serve sem apego.
E assim vencerás.*

(Emmanuel)

CALMA

Se você está no ponto de estourar mentalmente, silencie alguns instantes para pensar.
Se o motivo é a moléstia no próprio corpo, a intranquilidade traz o pior.
Se a razão é enfermidade em pessoa querida, o seu desajuste é fator agravante.
Se você sofreu prejuízos materiais, a reclamação é bomba atrasada, lançando novo caso.
Se perdeu alguma afeição, a queixa tornará você uma pessoa menos simpática, junto de outros amigos.
Se deixou alguma oportunidade valiosa para trás, a inquietação é desperdício de tempo.
Se contrariedades apareceram, o ato de esbravejar afastará de você o concurso espontâneo.
Se você praticou um erro, o desespero é porta aberta a faltas maiores.
Se você não atingiu o que desejava, a impaciência fará mais larga distância entre você e o objetivo a alcançar.
Seja qual for a dificuldade, conserve a calma , trabalhando , porque , em todo problema a serenidade é o teto da alma , pedindo o serviço por solução.

(André Luiz)

RESUMO

LODI, P.C. (2003). Aspectos de Degradação de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Poli Cloreto de Vinila (PVC), Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), 284 p.

O presente trabalho avalia a degradação de geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Poli Cloreto de Vinila (PVC) após exposição a diversos agentes agressivos. Foram utilizadas geomembranas de PEAD com espessuras de 0.8, 1.0, 1.5 e 2.5 mm e de PVC com espessuras de 1.0 e 2.0 mm. As amostras foram expostas à intempérie, lixívia, calor (estufa convencional e com fluxo de ar), radiação UV, resíduo de nióbio (a 50°C) e água (a 65° e 85°C). As análises foram realizadas periodicamente através da avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas. Análises térmicas também foram realizadas para a quantificação da degradação em nível molecular. As variações nas propriedades ocorreram em função do tipo e dos tempos de exposição. A exposição ao calor em estufa, por exemplo, ocasionou perda de deformabilidade com conseqüente aumento de rigidez nas geomembranas de PVC. Por outro lado, as geomembranas de PEAD tornaram-se mais dúcteis. Após exposição à intempérie e lixívia, verificou-se diminuição de deformabilidade para o PVC e aumento para o PEAD. A rigidez aumentou para o PVC enquanto que para o PEAD ocorreram oscilações principalmente nas maiores espessuras que apresentaram tendência de diminuição da propriedade ao final do período de análise. Os ensaios de OIT e MFI foram bastante úteis na quantificação da degradação dos materiais.

Palavras-Chave: geomembrana, degradação, propriedades físicas e mecânicas, análises térmicas.

ABSTRACT

LODI, P.C. (2003). Aspects of Degradation of High Density Poly Ethylene (HDPE) and PolyVinylChloride (PVC) Polymeric Geomembranes, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), 284 p.

This work evaluates the degradation of High Density Poly Ethylene (HDPE) and PolyVinylChloride (PVC) geomembranes after exposure to a variety of aggressive agents. HDPE (0.8, 1.0, 1.5 and 2.5 mm) and PVC (1.0 and 2.0 mm) geomembranes were exposed to weathering, leachate, heat (conventional and air oven), UV radiation, niobium (50°C) and water (65° and 85°C). The analyses were performed periodically with measurements of physical and mechanical properties. Thermal analyses were also carried out to quantify the variations at molecular level. Properties varied in function of the type of exposure and incubation period. Exposure to heat, for example, leads to decreases in deformability with increases in stiffness for the PVC geomembranes. Conversely, the HDPE geomembranes became softer. After exposure to weathering and leachate, deformability decreased for the PVC and increased for the HDPE. The PVC became stiffer while some oscillations in the rigidity occurred for the HDPE. These oscillations occurred mainly for the thicker specimens that showed trends of decreases in this property at the last period of observation. MFI and OIT tests were very useful in the quantification of the degradation processes.

Keywords: geomembrane, degradation, physical and mechanical properties, thermal analyses.

LISTA DE FIGURAS**Pág**

Figura 2.1 Exemplos da formação de uma cadeia polimérica para o PVC e o PEAD; representação usual simplificada (AGNELLI, 2000)	10
Figura 2.2 Diversas aplicações das geomembranas	28
Figura 2.3 Aplicações de geomembranas na área ambiental (KOERNER, 1991)	29
Figura 2.4 Aplicações de geomembranas na área geotécnica (KOERNER, 1991)	30
Figura 2.5 Métodos usados para produção de geomembranas (KOERNER, 1998)	32
Figura 2.6 Relação entre o valor K e o peso molecular numérico médio de resinas de PVC (TITOW, 1984)	44
Figura 2.7 Corpo de prova para ensaio de tração (Tipo IV – ASTM D638)	48
Figura 2.8 Comportamento tensão x deformação de diferentes geomembranas (Apud RIGO & CAZZUFFI, 1991)	49
Figura 2.9 Curva de tração para o PEAD	49
Figura 2.10 Ensaio de tração em uma geomembrana de PEAD	50
Figura 2.11 Ensaio de faixa larga em um geomembrana de PEAD	52
Figura 2.11 Equipamento para ensaio de tração axi-simétrico (KOERNER, 1998)	53
Figura 2.13 Diferentes técnicas de emendas em geomembranas (KOERNER, 1998)	56
Figura 2.14 Detalhes dos ensaios de cisalhamento e descolamento (GIROUD, 1984)	59
Figura 2.15 Corpo de prova para ensaio de rasgo (ASTM D1004)	62

Figura 2.16 Mecanismos de deformação de geomembranas sob carga pontual (SPARGUE & FROBEL, 1990)	63
Figura 2.17 Configurações de ensaios de cisalhamento direto (INGOLD, 1991)	67
Figura 2.18 Resultados de ensaio DSC para geomembranas de PEAD (MAIA, 2001)	72
Figura 2.19 Termograma DSC de uma geomembrana de PVC (HALSE ET AL., 1991)	73
Figura 2.20 Termograma DSC de uma geomembrana de VLDPE (HALSE ET AL., 1991)	74
Figura 2.21 Resultado de ensaio OIT para uma geomembrana de PEAD (2,5 mm)	76
Figura 2.22 Perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de PEAD (1,5 mm)	79
Figura 2.23 Perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de PVC (1,0 mm)	80
Figura 2.24 Comparação de espectros de energia de lâmpadas fluorescentes com a luz solar (ASTM G154)	99
Figura 2.25 Estrutura lamelar do PEAD (HSUAN, 2000)	128
Figura 2.26 Ruptura por tenso fissuramento (a) na borda de uma emenda (HSUAN, 2000); (b) propagação rápida (PEGGS, 1988)	129
Figura 2.27 Curva típica de um ensaio de tenso fissuramento conforme a D5397 (HSUAN, 2000)	131
Figura 2.28 Ciclos de oxidação no Polietileno (apud ROWE & SANGAM, 2002)	133
Figura 2.29 Estágios de degradação oxidativa de geomembranas de PEAD (HSUAN & KOERNER, 1998)	134
Figura 2.30 Estágios de oxidação para o Polietileno (a) puro (b) estabilizado com antioxidantes (HSUAN & KOERNER, 1998)	135
Figura 2.31 Faixa de variação de alguns antioxidantes (apud HSUAN & KOERNER, 1998)	138

Figura 2.32 Estruturas de antioxidantes (REMÉDIO, 1999)	139
Figura 2.33 Gráfico de Arrhenius generalizado para previsão de temperaturas em condições locais (KOERNER ET AL., 1992)	144
Figura 2.34 Desenho esquemático da câmara utilizada por MITCHELL & SPANNER (1985)	148
Figura 2.35 Modelo de Arrhenius para a previsão da vida útil através da ação de temperaturas elevadas (KOERNER, 1998)	149
Figura 3.1 Geomembranas expostas à intempérie	165
Figura 3.2 Caixas d'água para armazenamento das geomembranas e circulação da lixívia de esgoto doméstico	168
Figura 3.3 Geomembranas de PEAD imersas na lixívia	169
Figura 3.4 Geomembranas de PVC imersas na lixívia	169
Figura 3.5 Suporte de madeira com amostras de geomembranas	170
Figura 3.6 Estufa com amostras de geomembranas de PEAD e PVC	171
Figura 3.7 (a) Vista da estufa com circulação de ar (b) disposição das amostras na estufa	173
Figura 3.9 Detalhes do equipamento para promover o envelhecimento acelerado das amostras de geomembranas em contato com água e com o nióbio	176
Figura 3.10 (a) Detalhe da calha (b) Detalhe das lâmpadas UV (c) Lâmpadas em funcionamento (d) Amostras de geomembrana expostas	179
Figura 3.11 Equipamento utilizado para a realização de ensaios em geomembranas	181
Figura 3.12 Moldes utilizados na confecção dos corpos de prova	181
Figura 3.13 Corpos de prova (ensaios de propriedades mecânicas)	182
Figura 3.14 Ensaio de tração em andamento	183
Figura 3.15 Cilindro e pistão utilizados no ensaio de punção	184
Figura 3.16 Equipamento utilizado para o ensaio de punção	184

Figura 3.17 Ensaio de rasgo em andamento	186
Figura 3.18 Determinação da espessura de geomembranas	187
Figura 3.19 Determinação do volume das amostras pelo princípio de Arquimedes	188
Figura 3.20 a) Equipamento para determinação do MFI (b) detalhe das amostras extrudadas	190
Figura 3.21 Equipamento para realização de ensaio DSC com OIT	191
Figura 3.22 Curva térmica para obtenção do valor do OIT (modificado de HSUAN & KOERNER, 1998)	192
Figura 3.23 Equipamento utilizado nos ensaios de TGA	194
Figura 3.24 Ilustração dos Parâmetros obtidos no ensaio de TGA para uma amostra de PVC	195
Figura 4.1 Curvas dos ensaios de tração das amostras virgens	197
Figura 4.2 Curvas dos ensaios de Rasgo das amostras virgens	198
Figura 4.3 Curvas dos ensaios de Punção das amostras virgens	198
Figura 4.4 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 6 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	201
Figura 4.5 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 12 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	202
Figura 4.6 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 18 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	203
Figura 4.7 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 30 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	204
Figura 4.8 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 6 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	205

Figura 4.9 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 12 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	205
Figura 4.10 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 18 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	206
Figura 4.11 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 30 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)	206
Figura 4.12 Variação das Propriedades de tração após exposição à intempérie	207
Figura 4.13 Variação das Propriedades de tração após exposição à lixívia	208
Figura 4.14 Variação das Propriedades de tração após exposição à estufa convencional	209
Figura 4.15 Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à intempérie	210
Figura 4.16 Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à lixívia	210
Figura 4.17 Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à estufa convencional	211
Figura 4.18 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)	213
Figura 4.19 Resultados dos ensaios de tração para o PEAD (0.80, 1.0, 1.5 e 2.5 mm) após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)	214
Figura 4.20 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)	215

Figura 4.21 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para o PEAD (0.8, 1.0, 1.5 e 2.5 mm) após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)	215
Figura 4.22a Variação das Propriedades de tração após exposição à estufa com circulação de ar	216
Figura 4.22b Variação das Propriedades de tração após exposição à estufa com circulação de ar	217
Figura 4.23 Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à estufa com circulação de ar	218
Figura 4.24 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após exposição à Radiação UV (60°C) e condensação (50°C)	220
Figura 4.25 Resultados dos ensaios de tração, rasgo e punção para o PEAD (1.0 e 1.5 mm e 1.0 mm de cor branca) após exposição à Radiação UV (60°C) e condensação (50°C)	221
Figura 4.26 Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para o PVC e PEAD após exposição à Radiação UV (60°C) e condensação (50°C)	222
Figura 4.27 Variação das Propriedades de tração após exposição à Radiação UV e Condensação	223
Figura 4.28 Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à Radiação UV e Condensação	224
Figura 4.29 Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após exposição à água (65°C e 85°C) e ao Nióbio (50°C)	226
Figura 4.30 Resultados dos ensaios de Rasgo e ao Puncionamento após exposição à água (65°C e 85°C) e ao Nióbio (50°C)	227
Figura 4.31 Valores de OIT para as amostras intactas de PEAD	230
Figura 4.32 Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas em estufa convencional	230
Figura 4.33 Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas em estufa com circulação de ar	231

Figura 4.34 Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas na intempérie	231
Figura 4.35 Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas na lixívia	231
Figura 4.36 Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas com o nióbio	232
Figura 4.37 Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas com radiação UV	232
Figura 4.38 Análise conjunta dos resultados dos ensaios de TGA para o PEAD (0,8 e 2,50 mm)	235
Figura 4.39 Análise conjunta dos resultados dos ensaios de TGA para o PVC (1,0 e 2,0 mm)	236
Figura 4.40 Análise conjunta dos resultados dos ensaios de TGA para o PEAD (1,0 mm; 1,00 mm Branca e 1,5 mm)	237

LISTA DE TABELAS**Pág**

Tabela 2.1	Valores de Tg e Tm de alguns polímeros termoplásticos (MANRICH ET AL., 1997) Sigla, nome e densidade dos principais termoplásticos (MANRICH ET AL., 1997)	22
Tabela 2.2	Tipos Principais de Geomembranas em uso (KOERNER, 1990)	26
Tabela 2.3	Vantagens e Desvantagens de Membranas Sintéticas (BAGCHI, 1990)	27
Tabela 2.4	Geossintéticos poliméricos comumente usados e suas fórmulas aproximadas (KOERNER, 1998 - Modificado)	31
Tabela 2.5	Ensaio usuais em Geomembranas	38
Tabela 2.6	Intervalos de densidades para vários tipos de geomembranas de polietileno (HALSE ET AL., 1991)	41
Tabela 2.7	Tendência de comportamento de diversas propriedades relacionadas ao aumento da densidade do PE (SHARMA & LEWIS, 1994)	41
Tabela 2.8	Detalhes dos métodos de ensaios recomendados para geomembranas não reforçadas (KOERNER, 1998 - modificado)	50
Tabela 2.9	Valores comparativos dos ensaios de tração (KOERNER, 1998 – modificado)	54
Tabela 2.10	Métodos possíveis de costuras de campo para vários tipos de geomembranas (KOERNER, 1998)	58
Tabela 2.11	Intervalos típicos de resistência ao rasgo para várias geomembranas de acordo com a norma ASTM D1004 (SHARMA & LEWIS, 1994)	62
Tabela 2.12	Resultados típicos de ensaios ao puncionamento para várias geomembranas poliméricas (SHARMA & LEWIS, 1994)	65

Tabela 2.13 Valores de atrito para interfaces com geomembranas (simplificado de KOERNER, 1998)	68
Tabela 2.14 Valores típicos de ângulos de atrito Solo/Geomembrana (SHARMA & LEWIS, 1994)	69
Tabela 2.15 Aderência para geomembranas (Apud INGOLD, 1991)	69
Tabela 2.16 Técnicas de Monitoramento das Matérias-Primas dos Geossintéticos (HALSE ET AL., 1991)	70
Tabela 2.17 Resultados obtidos no ensaio de DSC em amostras virgens de PEAD (MAIA, 2001)	72
Tabela 2.18 Vantagens e desvantagens dos ensaios de OIT (HSUAN & KOERNER, 1998)	77
Tabela 2.19 Exemplo de especificação mínima de ensaios para atender requisitos de conformidade (BUENO, 2003)	85
Tabela 2.20 Relação de propriedades e parâmetros para controle de geomembranas em aterros de resíduos (apud BUENO, 2003)	85
Tabela 2.21 Efeitos sobre geomembranas expostas à intempérie e resíduos (HAXO & NELSON, 1984)	88
Tabela 2.22 Fatores que afetam a durabilidade de geomembranas (preparado de HAXO & NELSON, 1984)	89
Tabela 2.23 Comprimentos de onda (λ) da radiação UV de máxima sensibilidade para vários polímeros (Adaptado de SUITS & HSUAN, 2003 e de AGNELLI, 2002)	98
Tabela 2.24 Guia geral da resistência química para algumas geomembranas mais comuns (KOERNER, 1998)	110
Tabela 2.25 Sugestão para valores limites de diferentes ensaios em geomembranas incubadas (KOERNER, 1998)	126
Tabela 2.26 Tipos de antioxidantes (HSUAN & KOERNER, 1998)	138
Tabela 2.27 Ensaio possíveis para avaliar a degradação polimérica para uso no Modelo de Arrhenius (KOERNER ET AL., 1992)	145
Tabela 3.1 Processos de envelhecimento avaliados e seus respectivos períodos de análise	161

Tabela 3.2	Ensaaios realizados e respectivas normas	162
Tabela 4.1	Valores de MFI para as amostras de PEAD	228
Tabela 4.2	Valores de OIT para as amostras de PEAD	229
Tabela 4.3	Valores das perdas de massa no ensaio de TGA (PVC)	233
Tabela 4.4	Valores das perdas de massa no ensaio de TGA (PEAD)	234

LISTA DE SIGLAS , ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

USEPA = United States Environmental Protection Agency

CQ = Controle de Qualidade

CQF = Controle de Qualidade de Fabricação

CQI = Controle da Qualidade de Instalação

CV = Coeficiente de Variação referente aos Ensaios Físicos e Mecânicos

CSPE = Poli (Etileno Clorossulfonado)

CSPE-R = Poli (Etileno Clorossulfonado Reforçado)

DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO = Demanda Química de Oxigênio

DQO = Demanda Química de Oxigênio

DSC = Calorimetria Diferencial de Varredura

E = Módulo de Elasticidade, referente à inclinação da porção inicial

EIA = Interpolímero de Etileno (liga)

F = Resistência ao Rasgo ou Puncionamento

GQ = Garantia de Qualidade

GQI = Garantia da Qualidade de Instalação

GQM = Garantia da Qualidade de Fabricação

GM = Geomembrana

GRI = Geosynthetic Research Institute

HDPE = Poli (Etileno de Alta Densidade) – Sigla Internacional

IR = Espectroscopia Infravermelho

K = Permeabilidade do Solo

LDPE = Poli (Etileno de Densidade Linear)

LLDPE = Poli (Etileno Linear de Baixa Densidade)

MDPE = Poli (Etileno de Densidade Média) - Sigla Internacional

MFI = Índice de Fluidez (*Melt Flow Index*)

NTCL = Corte Sob Tensão Constante

OIT = Tempo de Indução à Oxidação

PE = Poli (Etileno)

PEAD = Poli (Etileno de Alta Densidade) – Sigla Nacional

PET = Poli (Etileno Tereftalato)

PGI = PVC Geomembrane Institute Technology

PVC = Poli (Cloroeto de Vinila)

SC = Stress Cracking (microfissuramento sob tensão)

SP - NTCL = Corte Sob Tensão Constante – Ponto Único

SVT = Permeação a Vapores de Solventes

TGA = Análise Termogravimétrica

Tg = Temperatura de Transição Vítrea

TMA = Análise Termomecânica

Tm = Temperatura de Fusão

VLDPE = Poli (Etileno de Densidade Muito Baixa)

WVT = Permeação ao Vapor de Água

ΔH = Entalpia de Fusão

σ = Resistência à Tração

ε = Deformação Específica

$\sigma_{\text{últ}}$ = Resistência à Tração na Ruptura

$\varepsilon_{\text{últ}}$ = Deformação na Ruptura à Tração

da curva tensão-deformação

c' = Intercepto de Coesão Efetiva

ϕ' = Ângulo de Atrito Interno do Solo

δ = Ângulo de Atrito de Interface Solo-Geossintético

α = Razão entre a Adesão na Interface e o Intercepto de Coesão do Solo

(A)= Parâmetro obtido no ensaio de TGA, correspondente ao primeiro processo de derretimento

(B) = Parâmetro obtido no ensaio de TGA, correspondente ao segundo processo de derretimento

(C) = Parâmetro obtido no ensaio de TGA, correspondente ao terceiro processo de derretimento

SUMÁRIO	Pág
RESUMO	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xiii
 1. INTRODUÇÃO	 01
1.1. Considerações Gerais	01
1.2. Experiência Brasileira	04
1.3. Descrição da Pesquisa	06
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 07
2.1. Introdução	07
2.2. Definições Básicas	07
2.2.1. Polímeros e Suas Principais Matérias-Primas	07
2.2.2. Conceito de Polimerização	09
2.2.3. Peso Molecular e Distribuição de Peso Molecular	12
2.2.4. Classificação de Polímeros	14
2.2.5. Cristalinidade em Polímeros	16
2.2.6. Transições Térmicas em Polímeros	20
2.3. Geomembranas Poliméricas	23
2.4. Fabricação	31
2.5. Ensaio em Geomembranas	35
2.5.1. Espessura	39
2.5.2. Densidade	39
2.5.3. Índice de Fluidez (MFI) e Valor K	42

2.5.4. Massa por Unidade de Área	45
2.5.5. Permeação ao Vapor de Água (WVT)	45
2.5.6. Permeação a Vapores de Solventes (SVT)	46
2.5.7. Propriedades de Tração	46
2.5.8. Emendas de Geomembranas	55
2.5.9. Resistência ao Rasgo	61
2.5.10. Resistência ao Puncionamento	63
2.5.11. Resistência de Interface	65
2.5.12. Análises da Matéria-Prima dos Geossintéticos	69
2.6. Controle de Qualidade, de Manufatura e Ensaios de Conformidade	82
2.7. Degradação de Geomembranas	86
2.7.1. Considerações Gerais	86
2.7.2. Principais Tipos de Degradação	92
2.7.2.1. Degradação Radioativa	92
2.7.2.2. Degradação Biológica	92
2.7.2.3. Degradação Ultravioleta (UV)	97
2.7.2.4. Degradação Térmica	105
2.7.2.5. Degradação Química	108
2.7.2.6. Degradação por Oxidação	132
2.8. Métodos de Estimativa de Vida Útil	140
2.9. Considerações Finais	151
3. MATERIAIS E MÉTODOS	158
3.1. Introdução	158
3.2. Processos de Envelhecimento	163
3.2.1. Exposição à Intempérie	163
3.2.2. Exposição à Lixívia de Esgoto Doméstico	166
3.2.3. Envelhecimento Térmico em Estufa Convencional	169
3.2.4. Envelhecimento Térmico em Estufa com Circulação de Ar	

	171
3.2.5 Envelhecimento Acelerado em Banho Térmico com Água e Compatibilidade Química com Resíduo de Mineração (Nióbio)	174
3.2.6 Envelhecimento por Radiação UltraVioleta (60°C) e Processo de Condensação (50°C)	177
3.3. Equipamentos Utilizados para os Ensaios de Propriedades Físicas e Mecânicas	180
3.3.1 Ensaio de Tração	182
3.3.2 Ensaio de Punção	183
3.3.3 Ensaio de Rasgo	185
3.3.4 Determinação da Espessura	186
3.3.5 Determinação da Densidade	188
3.3.6 Determinação da Massa por Unidade de Área	189
3.3.7. Determinação do Índice de Fluidiez (MFI)	189
3.3.8. Determinação do Tempo de Oxidação (OIT)	191
3.3.9. Análise Termogravimétrica (TGA)	193
4. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	196
4.1. Introdução	196
4.2. Apresentação dos Resultados	196
4.2.1. Propriedades de Tração das Amostras Intactas	196
4.2.2. Propriedades de Tração das Amostras Expostas à Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional	199
4.2.3. Propriedades de Tração das Amostras Expostas à Estufa com Circulação de Ar	211
4.2.4. Propriedades de Tração das Amostras Expostas aos Efeitos da Radiação UV e Condensação (45 dias e 6 meses)	218
4.2.5. Propriedades de Tração após Compatibilidade em Água a 65° e 85°C e ao Nióbio a 50°C	224

4.2.6.	Análises Térmicas	228
4.3.	Discussão dos Resultados Obtidos	238
4.3.1.	Propriedades Físicas	238
4.3.2.	Propriedades Mecânicas	238
4.3.3.	Propriedades Térmicas	255
5.	CONCLUSÕES	264
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	267

ANEXOS

1 - INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma barreira impermeabilizante bem projetada e instalada com geomembranas poderá apresentar degradação ou envelhecimento com o tempo levando-a à ruptura (ROWE & SANGAM, 2002). Apesar das vantagens oferecidas pelas geomembranas em relação a materiais de uso consagrado, estas podem degradar quando expostas à radiação UV (intempéries), temperaturas elevadas, oxidação ou quando em contato com materiais agressivos, lixívias e resíduos industriais. Diversas investigações têm avaliado o envelhecimento das geomembranas uma vez que o envelhecimento é uma das principais preocupações para materiais empregados em barreiras de contenção (HSUAN & KOERNER, 1995; REDDY & BUTUL, 1999).

As geomembranas são materiais flexíveis e manufaturados fabricados a partir de produtos sintéticos ou betuminosos cuja função é a de prover uma camada "impermeável" para controlar a percolação e fluxo de líquidos, e em alguns casos, gases (VAN SANTVOORT, 1994). São utilizadas na engenharia ambiental principalmente na proteção de água subterrânea, de lagoas de esgotos e rejeitos industriais e aterros domésticos/industriais. São utilizadas também em barragens de terra ou em faces de barragens de terra e enrocamento. As geomembranas possuem também grande aplicabilidade quando se pretende aumentar a estabilidade de taludes e paredes de escavação com o controle ou a drenagem de

infiltração de água no controle de infiltração em argilas expansivas sob estruturas (POHL & WESTON, 1992).

Para uma escolha adequada de uma geomembrana, deve-se levar em conta suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, tendo-se em vista a manutenção de sua integridade e permeabilidade. Os requisitos mais importantes para a escolha da geomembrana, após uma análise do projeto, são o comportamento tensão-deformação, o atrito de interface que se desenvolve entre sua superfície e os materiais que estarão sobre e sob ela, a compatibilidade química, propriedades hidráulicas e durabilidade.

Com relação à compatibilidade química, verifica-se que as geomembranas são utilizadas largamente na contenção de líquido e/ou lixo sólido. Dessa forma, existe uma significativa quantidade de dados sobre a compatibilidade química de vários tipos de geomembranas com as várias composições químicas dos materiais com os quais estará em contato. Os dados baseiam-se em ensaios sobre várias propriedades físicas e químicas seguindo períodos específicos de imersão. As amostras são imersas em líquido no qual a geomembrana estará em contato. A maioria dos fabricantes tem gerado e monitorado esses dados, especialmente para membranas de Polietileno (PE) e de Poli Cloreto de Vinila (PVC). Diferentes tipos de geomembranas, variando no polímero básico e nos ingredientes da composição, podem inicialmente ser considerados para cada instalação específica. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA), por exemplo, requer que as geomembranas utilizadas na contenção de resíduos perigosos sejam testadas para a avaliação da compatibilidade com os resíduos líquidos de acordo com o método 9090 da EPA. O método consiste na exposição de amostras a resíduos perigosos para simular as condições de serviço e avaliar o processo após 120 dias. As propriedades da geomembrana são avaliadas antes e depois da exposição.

Com relação à durabilidade, sabe-se que a questão de degradação de materiais geossintéticos quando enterrados vem sendo objeto de preocupação constante e crescente, visto que estes materiais são empregados em obras permanentes, cujos tempos de vida útil por vezes podem superar 100 anos ou mais. Algumas metodologias para a avaliação da degradação de materiais poliméricos usados em aplicações de longo prazo dentro da Engenharia Geotécnica vêm sendo pesquisadas por diversos especialistas. Uma dessas técnicas de previsão é baseada no princípio de superposição temperatura-tempo. Tal modelo utiliza altas temperaturas de incubação para os materiais poliméricos seguindo-se ensaios específicos de laboratório. Dessa maneira, pode-se extrapolar o comportamento local especificado para uma dada temperatura através do comportamento experimental a temperaturas superiores. Assume-se que o comportamento do material a altas temperaturas seja constante no período de incubação e pode ser extrapolado para um comportamento a temperaturas menores de interesse prático (KOERNER ET AL., 1992).

A degradação dos materiais poliméricos, em particular, as 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 apoiam 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 por variações intensas de temperatura (principalmente em países tropicais, como o Brasil), de ciclos de umedecimento e secagem, de exposição à intempérie (raios ultravioletas), de contato com meios de pH diferentes, variando desde meios ultra-ácidos a ultrabásicos. 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. EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

Apesar do crescente nível de consciência dos profissionais da área e das pesquisas que se desenvolvem no mundo sobre estas questões, a realidade brasileira é ímpar, pois envolve materiais particulares e clima característico.

Em nosso país, os efeitos de temperatura devem ser considerados, pois podem aumentar muito durante o dia e/ou variar muito entre o dia e a noite. Com o aumento elevado da temperatura, a contração da geomembrana pode ser irreversível devido à perda de componentes voláteis. Tal contração (relaxação de orientação) é insignificante nas geomembranas de polietileno pelo fato destas não conterem componentes voláteis. Por outro lado, as geomembranas de PVC, que contêm substâncias plastificantes (componentes voláteis), podem se tornar mais rígidas e quebradiças pela perda destes. Nas aplicações onde a geomembrana permanece exposta à radiação solar (lagoas, represas, canais, etc), os efeitos de temperatura são extremamente importantes (POHL & WESTON, 1992).

Constata-se através da literatura, que as geomembranas vêm sendo utilizadas com relativo sucesso ao longo dos anos na retenção de resíduos municipais e perigosos (PEGGS, 1992). No entanto, nota-se que a literatura a respeito das aplicações, propriedades e características positivas e negativas das

geomembranas restringe-se muito à experiência internacional. Isso é de certa forma algo positivo, pois a experiência internacional fornece subsídios importantes para o conhecimento dos materiais geossintéticos.

A utilização de materiais geossintéticos no Brasil é extremamente 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, necessário que se compreendam o comportamento e as diversas formas de interação desses materiais nas suas aplicações. Dessa forma, diversos pesquisadores têm procurado estudar e avaliar o comportamento das geomembranas. Nesse particular, há um esforço constante para a compreensão dos diversos tipos de ensaios e metodologias propostas por diferentes sistemas normativos. Objetiva-se cada vez mais a organização de normas nacionais para a avaliação das propriedades das geomembranas e das especificações para projetos.

Com relação aos processos de envelhecimento e durabilidade das geomembranas, os dados existentes restringem-se unicamente a ensaios de laboratório. 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, como nos ensaios de compatibilidade química, os resultados são apenas de caráter qualitativo face à inexistência de critérios para quantificação dos níveis degradativos. Nesse sentido, há a necessidade de se conhecer como os materiais disponíveis no mercado brasileiro comportam-se quando em contato com vários resíduos industriais nas condições climáticas locais. Este é um tema de trabalho importante e extremamente necessário nos dias atuais, face ao crescente emprego de geomembranas em projetos de contenção e armazenamento de rejeitos no Brasil.

1.3 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho avalia o comportamento das propriedades físicas e mecânicas de geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e de Poli Cloreto de Vinila (PVC) intactas e após exposição a diferentes processos de envelhecimento. Esses processos abordam ensaios de campo e de laboratório conforme as normas específicas. Utilizaram-se as normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) pela facilidade de manuseio e por serem amplamente utilizadas no contexto internacional. Para melhor compreensão da degradação dos materiais, realizaram-se também, análises térmicas comparativas (TGA e OIT) bem como o ensaio de índice de fluidez (MFI) nos materiais intactos e degradados.

O escopo da tese divide-se em seis capítulos e uma parte referente a anexos onde se encontram as tabelas com os principais resultados obtidos.

O capítulo 2 apresenta diversas considerações sobre os materiais poliméricos, ensaios em geomembranas e seus respectivos processos de degradação.

Os detalhes referentes a cada processo de envelhecimento e dos tempos utilizados em cada exposição encontram-se no capítulo 3 que trata dos métodos e materiais utilizados.

As análises dos resultados obtidos e principais conclusões estão apresentadas nos capítulos 4 e 5, respectivamente. Finalmente, no capítulo 6 encontram-se as referências bibliográficas.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Para uma melhor compreensão de algumas particularidades das geomembranas, necessário que se faça inicialmente, algumas considerações acerca de suas principais matérias-primas, os polímeros. Dessa forma, o item 2.2 resume algumas questões básicas referentes ao comportamento, tipos e propriedades dos principais polímeros utilizados na fabricação das geomembranas poliméricas. Os itens 2.3 a 2.7 explicitam as principais propriedades das geomembranas assim como os respectivos processos degradativos que possam vir a ocorrer nestas. O item 2.8 aborda a questão da previsão da vida útil das geomembranas e, no item 2.9, alguns comentários finais são traçados acerca da degradação de geomembranas de HDPE e PVC.

2.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS

2.2.1. Polímeros e Suas Principais Matérias-Primas

Os polímeros são materiais orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos, constituídos essencialmente por macromoléculas formadas por unidades que se repetem de dezenas a milhares de vezes, ao longo de uma seqüência em cadeia. Em grego, *poli* significa muitas e, *mero*, *partes* (unidades repetitivas). Daí deriva-

se o termo *polímero*. Quando é necessária uma diferenciação, o termo copolímero é utilizado para designar aqueles produtos que apresentam dois ou mais tipos diferentes de *meros* em uma mesma molécula. As características dos polímeros variam muito, uma vez que dependem da natureza química e física das unidades repetitivas (MANRICH ET AL., 1997).

O monômero é uma molécula simples, pelo menos bifuncional, que em condições adequadas dá origem à unidade de repetição (*mero*) das muitas cadeias poliméricas que formam o polímero. Dessa forma, a união por covalência desses *meros*, forma as macromoléculas. As características de cada polímero serão definidas a partir do tipo de macromoléculas, seus pesos moleculares e suas formas de interação. As condições adequadas para que os monômeros formem polímeros são fornecidas pelas reações do processo químico denominado polimerização.

As propriedades dos polímeros estão fortemente relacionadas às suas estruturas químicas. Fatores como peso molecular e distribuição de peso molecular, ligações primárias e secundárias, cristalinidade, estereorregularidade, etc, são fortemente responsáveis pelas propriedades destes materiais.

As principais fontes de matéria-prima para os polímeros podem ser divididas em três grupos: produtos naturais, hulha e petróleo.

Dentro do grupo dos produtos naturais, encontra-se a celulose que através de modificações físico-químicas resulta no nitrato de celulose, acetato de celulose e o acetato butirato de celulose. Outro exemplo é a borracha natural obtida a partir do látex que consiste numa emulsão da borracha em água. Outros produtos naturais que podem produzir polímeros são o óleo de mamona na produção de nylon 11 e o óleo de soja na produção de nylon 9.

A hulha (carvão mineral) após destilação seca produz gás de hulha donde é possível separar o etileno (para a produção dos polietilenos) e metano (que servirá para produzir formaldeído e, conseqüentemente, resinas fenol-formaldeído, uréia-formaldeído e melamina-formaldeído). Do coque do alcatrão de hulha obtém-se acetileno (via reação CaO) que com água, por hidrogenação, produz etileno, ou por reação com ácido clorídrico (HCl), produz cloreto de vinila para a produção do Poli (Cloreto de Vinila).

Finalmente, o petróleo aparece como a fonte mais importante de todos os produtos minerais. Após a destilação fracionada do petróleo, a fração que interessa para os polímeros é a nafta. Essa fração irá gerar várias frações contendo moléculas saturadas e insaturadas após sofrer um processo de craqueamento térmico apropriado. As moléculas insaturadas (etileno, propileno, butadieno, buteno, isobutileno, aromáticos, etc) são separadas e aproveitadas para a síntese dos respectivos polímeros.

2.2.2. Conceito de Polimerização

Processo que consiste na reação de um ou mais monômeros visando a obtenção ou a síntese de um polímero. A polimerização que forma um polímero com uma única unidade de repetição é chamada homopolimerização e o polímero sintetizado é denominado de homopolímero.

Cada uma das moléculas de um homopolímero pode ser genericamente representada por: $\sim\text{A} - \text{A} - \text{A} - \text{A} - \text{A} - \text{A}\sim$. Onde A é a unidade repetitiva originada do monômero.

Copolimerização é o termo geral para a polimerização envolvendo dois ou mais monômeros, desde que resulte em cadeias poliméricas formadas por dois ou mais meros diferentes (duas ou

mais unidades de repetição), sendo o polímero obtido chamado copolímero.

Quanto ao método de preparação, as polimerizações dividem-se em poliadição e policondensação.

As poliadições são polimerizações não acompanhadas da formação de subprodutos, e que, quando convencionais, são polimerizações com mecanismo de reações em cadeia. Quando não convencionais, as poliadições podem apresentar mecanismos de reações em etapas, como ocorre nas sínteses dos poliuretanos. As policondensações são polimerizações acompanhadas da formação de subprodutos, com mecanismo de reações em etapas. Os polietilenos e o poli (cloreto de vinila) são obtidos a partir de poliadições.

A Figura (2.1) exemplifica a formação de uma cadeia polimérica a partir de seu monômero.

Figura 2.1 – Exemplos da formação de uma cadeia polimérica para o PVC e o PEAD; representação usual simplificada (AGNELLI, 2000)

O uso de siglas para representar ou substituir a nomenclatura de polímeros é muito freqüente, e praticamente, essas siglas são aceitas internacionalmente:

LDPE	Polietileno de baixa densidade
LLDPE	Polietileno Linear de baixa densidade
HDPE (PEAD)	Polietileno de alta densidade
CSPE (PECS)	Poli (etileno clorossulfonado)
CSPE-R	Poli (etileno clorossulfonado reforçado)
CPE	Poli (etileno clorado)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
HIPS	Poliestireno de alto impacto
PVC	Poli (cloreto de vinila)
EVA	copolímero de etileno – acetato de vinila
ABS	Terpolímero* de acrilonitrila – butadieno - estireno
PC	Policarbonato
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PBT	Poli (tereftalato de butileno)
PU	Poliuretano
SBR	Copolímero debutadieno – estireno ou borracha SBR

* Terpolímero: caso particular de copolímero formado por três meros diferentes.

2.2.3. Peso Molecular¹ e Distribuição de Peso Molecular

O peso molecular é um dos aspectos estruturais fundamentais dos polímeros e deve ser tratado em termos de valores médios, ou seja, através de cálculo estatístico, numérico ou ponderal, dos pesos moleculares de todas as cadeias macromoleculares que formam uma massa polimérica ou um material polimérico (KOERNER, 1998; AGNELLI, 2000).

Quanto maior o peso molecular de um polímero, ou seja, quanto maiores suas macromoléculas, melhores suas propriedades mecânicas, porém maior a dificuldade de processamento em função da maior viscosidade do polímero quando no estado fundido.

As propriedades únicas dos polímeros são resultantes em primeiro lugar do alto peso molecular que possuem. O peso molecular é a propriedade mais importante de qualquer sistema polimérico (HENNINGER ET AL., 1986).

Os principais tipos de pesos moleculares são: o peso molecular numérico médio ($\overline{Mn}$), o peso molecular ponderal médio ($\overline{Mw}$) e o peso molecular viscosimétrico médio ($\overline{Mv}$). Cada um desses valores médios pode ser definido pelo produto do grau de polimerização (n) médio correspondente (numérico, ponderal ou viscosimétrico) pelo peso molecular do mero (ou unidade de repetição) do polímero. O grau de polimerização (n) expressa o número de unidades repetitivas que formam a cadeia polimérica, sempre abordado em termos de valores médios, uma vez que o processo de polimerização produz macromoléculas de tamanho variado.

Enquanto o peso molecular numérico médio é fortemente dependente do número de moléculas dentro de cada faixa de peso molecular, o peso molecular ponderal médio é sensível à massa de

---

¹ “Peso molecular” é o termo usual. A nomenclatura recomendada é “massa molar”

cada uma das macromoléculas da amostra (média ponderada do peso das cadeias).

Geralmente, os polímeros de interesse industrial possuem pesos moleculares médios superiores a 10.000. O Polietileno de alta densidade (PEAD) possui um $\overline{Mn}$ que varia de 20.000 a 60.000 e o Poli (Cloro de Vinila) (PVC) um $\overline{Mn}$ que varia de 40.000 a 80.000 (flexível) e de 30.000 a 50.000 (rígido).

Além das determinações diretas dos pesos moleculares médios dos polímeros, existem ainda as determinações indiretas que se apresentam muito práticas em se tratando da rapidez e da facilidade experimental para a obtenção dos resultados. No entanto, os valores obtidos pelos métodos indiretos não podem ser correlacionados diretamente com as distribuições de peso molecular. Tais correlações só podem ser feitas com os adequados valores médios de pesos moleculares.

Essas avaliações indiretas são feitas principalmente por dois métodos distintos:

- a) Parâmetros relacionados com o método das Viscosidades de Soluções Diluídas onde se destacam as medidas de Viscosidade Relativa e o Valor K (específico para o PVC);
- b) Ensaio normalizado para a determinação do índice de fluidez (ou índice de fusão) de termoplásticos (MFI).

Esses dois métodos serão abordados posteriormente no item (2.5) que trata dos ensaios específicos para geomembranas poliméricas.

2.2.4. Classificação dos Polímeros

Os diferentes tipos de polímeros sintéticos podem ser classificados com base em suas estruturas químicas moleculares, nas reações de obtenção dos polímeros, no comportamento mecânico, etc. A classificação mais conhecida e utilizada é a que se baseia no comportamento mecânico: *elastômeros* e *plásticos*. Os plásticos, por sua vez, são divididos em *termoplásticos* e *termofixos*.

A seguir, apresenta-se uma pequena síntese sobre essas classificações.

- *Classificação baseada na estrutura química dos polímeros:* os polímeros são divididos de acordo com o tipo de átomos que formam suas cadeias principais. São estes:
  - Polímeros de cadeia carbônica: onde somente átomos de carbono estão presentes nas cadeias poliméricas principais. Exemplos: Poliolefinas (LDPE, LLDPE, HDPE, PP), EVA, PS, PVC, Poli Tetraflúor Etileno, “Teflon”, Poli (Metacrilato de Metila) e Polímeros Diênicos (Polibutadieno, SBR).
  - Polímeros de cadeia heterogênea: possuem átomos diferentes do carbono em suas cadeias poliméricas principais. Exemplos: Nylons ou Poliamidas, Poliacetais, Policarbonato, Poliésteres saturados (PET e PBT), Poliésteres Insaturados, Epóxis, Poliuretanos e Silicones.
- *Classificação quanto ao método de preparação do polímero:* os polímeros podem ser classificados aqui como:
  - Polímeros sintetizados por polimerizações em cadeia (Polímeros de adição);
  - Polímeros sintetizados por polimerizações em etapas (Polímeros de Condensação e os Poliuretanos);

- Polímeros artificiais, obtidos por modificações químicas de polímeros naturais;
  - Polímeros obtidos por modificações químicas de polímeros sintéticos.
-
- *Classificação quanto ao comportamento mecânico do polímero:* com base neste critério os polímeros separam-se em plásticos (termoplásticos e termofixos), fibras (sempre termoplásticos) e elastômeros (borrachas vulcanizadas ou elastômeros termoplásticos).
    - *Plástico:* é um material cujo constituinte fundamental é um polímero, sólido em sua condição final (como produto acabado) e que em alguma fase de sua produção foi transformado em fluido, adequado à moldagem por ação de calor e/ou pressão. Os plásticos além do(s) polímero(s) de base podem conter vários tipos de aditivos. Em função de sua natureza química e/ou de seus aditivos, os plásticos podem ser rígidos, semiflexíveis ou semi-rígidos e flexíveis. Em relação aos processos tecnológicos, os plásticos se dividem em termoplásticos e termofixos (ou termorrígidos).
    - *Fibras Poliméricas:* são materiais definidos pela condição geométrica de alta relação entre o comprimento e o diâmetro da fibra. Em polímeros, a razão de aspecto (relação do comprimento da fibra pelo seu diâmetro) deve ser igual ou maior que cem. As fibras poliméricas são termoplásticos com cadeias lineares orientadas no sentido do eixo da fibra (orientação longitudinal). As principais fibras poliméricas são nylons, poliésteres saturados (principalmente o Poli (Tereftalato de Etileno), a Poliacrilonitrila e Fibras Poliolefinicas);

- *Elastômeros:* são materiais poliméricos que exibem elasticidade em longas faixas de deformação na temperatura ambiente. As borrachas tradicionais são borrachas vulcanizadas que possuem poucas ligações cruzadas. Os elastômeros termoplásticos (copolímeros em bloco SBS e SIS e o elastômero comercial Santoprene) apresentam características elastoméricas mesmo não sendo vulcanizadas, isto é, mesmo sendo estruturalmente termoplásticos.
- *Classificação quanto às características tecnológicas do polímero:* segundo este aspecto, os polímeros (plásticos) se classificam em termoplásticos e termofixos (ou termorrígidos):
  - *Termoplásticos:* são materiais poliméricos capazes de serem repetidamente amolecidos e moldados pelo aumento da temperatura e endurecidos pela diminuição desta. O aquecimento não promove reações químicas entre as cadeias poliméricas, apenas desfaz as interações físicas mais fortes, tornando o material moldável. Esta alteração pode provocar alguma degradação no termoplástico, para um número elevado de ciclos de aquecimento e de resfriamento. Estruturalmente, as ligações entre as diferentes cadeias poliméricas são lineares, ou seja, só ocorrem interações intermoleculares secundárias reversíveis com a temperatura. Podem ser essencialmente amorfos (PVC) ou apresentar cristalinidade parcial (HDPE). Em função da quantidade e da qualidade da aplicação em que são empregados, os termoplásticos podem ser convencionais, especiais e de engenharia. Os termoplásticos de engenharia apresentam melhores propriedades térmicas e mecânicas, ressaltando-se a tenacidade a altas e/ou

baixas temperaturas aliada à possibilidade de utilização em aplicações de longa duração. Normalmente, apresentam custos maiores se comparados com os convencionais. MANRICH ET AL. (1997) citam exemplos de termoplásticos de engenharia, a saber: as *poliamidas* (NYLONS) usadas, por exemplo, em engrenagens plásticas, carcaças de ferramentas e tecidos impermeáveis; *policarbonato* (PC), para a fabricação de CDs, janelas de aeronaves, postes de iluminação e semáforos; *poli (óxido de fenileno) modificado com poliestireno* (NORYL), utilizado em painéis de instrumentos e em autopeças. Encontram-se entre os termoplásticos convencionais, as *Poliolefinas* (LDPE, LLDPE, HDPE e PP), *Poliestireno* (PS) e seus derivados, *Poli (Cloreto de Vinila)* (PVC) e *Poli (Tereftalato de Etileno - PET)* que dá origem a vários membros da família dos geossintéticos. Na família dos termoplásticos especiais destacam-se o *Poli (Metacrilato de Metila) - PMMA* (“acrílico”) e o *Politetraflúoretileno - PTFE* (“Teflon”).

- *Termofixos*: são materiais plásticos que quando curados, com ou sem aquecimento, não podem ser reamolecidos por aquecimento. Estruturalmente, os termofixos têm como componentes fundamentais polímeros com cadeias moleculares contendo alta densidade de ligações químicas primárias entre as cadeias diferentes – ligações cruzadas – que geram o comportamento dos termofixos os quais podem também ser chamados polímeros reticulados ou polímeros com alta densidade de ligações cruzadas. Os termofixos podem conter aditivos, quando necessário, podendo ser aplicados como plásticos de engenharia, como é o caso dos poliésteres insaturados reforçados com fibras de vidro. São exemplos de termofixos as resinas fenólicas (resinas fenol-

formaldeído), resinas uréia-formaldeído, resinas epóxi, resinas de poliéster insaturado, etc.

- *Classificação de acordo com o tipo de cadeia polimérica:* os polímeros podem apresentar cadeias lineares (ou macromoléculas poliméricas lineares), cadeias ramificadas e cadeias com ligações cruzadas, apresentando este último tipo duas possibilidades – cadeias com baixa densidade de ligações cruzadas (borrachas vulcanizadas) e cadeias com alta densidade de ligações cruzadas (termofixos). As ligações cruzadas são ligações químicas primárias, do tipo covalente, interligando diferentes cadeias poliméricas, de forma a impedir o deslizamento de umas em relação às outras.

2.2.5. Cristalinidade em Polímeros

Em materiais sólidos convencionais, a cristalinidade consiste em um arranjo regular perfeito e repetitivo dos átomos individuais nas três direções cristalográficas. No caso dos polímeros, a cristalinidade, quando ocorre, nunca é total e consiste no alinhamento de segmentos de cadeias em um arranjo tridimensionalmente perfeito. Nesses casos, os polímeros são denominados semicristalinos². Os domínios cristalinos dos polímeros (cristalitos) contêm mais imperfeições que os cristais dos sólidos convencionais além de estarem interconectados com as regiões cristalinas e amorfas sem uma clara divisão dessas regiões. A facilidade de cristalização dependerá da estrutura química, peso molecular e condições de cristalização do polímero.

---

² O termo semicristalino não retrata de forma lógica o seu significado sendo mais apropriado que se designe o polímero como pouco ou muito cristalino.

Algumas propriedades físicas e mecânicas relacionam-se diretamente com o grau de cristalinidade do polímero e da morfologia de suas regiões cristalinas, ou seja, quanto mais cristalinos os polímeros, maiores serão estas propriedades, a saber: rigidez, resistência química, densidade, estabilidade dimensional, resistência à abrasão, temperatura de fusão (T_m) e de transição vítrea (T_g), etc. No entanto, a cristalinidade causa a diminuição de outras propriedades: resistência ao impacto, alongamento na ruptura, claridade ótica e resistência ao fenômeno do stress-cracking (microfissuramento sob tensão).

Os fatores que favorecem a cristalinidade do polímero são aqueles que aumentam a ordem, a regularidade, que facilitam o empacotamento e, conseqüentemente, favorecem a formação de cristalitos. Os principais fatores são: a linearidade, a taticidade, grupo lateral volumoso, configuração em torno de duplas ligações $C=C$, polaridade, rigidez, copolímero e aditivos.

A linearidade (cadeias lineares) facilita o empacotamento, favorecendo a cristalinidade. O HDPE com cadeias lineares apresenta cristalinidade da ordem de 90% e o LDPE com cadeias ramificadas só atinge valores da ordem de 40%.

A taticidade (estereorregularidade) dos polímeros caracteriza-se por uma ordem na disposição do grupo lateral (regularidade) conferindo, portanto, cristalinidade ao polímero.

A presença de grupos laterais à cadeia principal dificulta um empacotamento regular das cadeias reduzindo a capacidade de cristalização. Veja-se, por exemplo, o caso do HDPE com 90% de cristalinidade (grupo lateral H – 4 por mero) e do PVC com 10% de cristalinidade (grupo lateral Cl – 1 por mero).

As configurações em torno de duplas ligações $C=C$ próximas a do tipo “ziguezague planar” podem ocorrer em polímeros derivados de dienos com isomeria trans. É o caso de borrachas trans

que podem apresentar, sob tração, o efeito de cristalização uma vez que as cadeias podem se organizar de maneira ordenada.

A presença de polaridade na molécula não é uma obrigatoriedade para a cristalinidade, mas se estiver presente irá facilitar a aproximação das cadeias (aumentar o empacotamento) e, conseqüentemente, gerar cristalinidade.

A presença de cadeias poliméricas rígidas facilita o empacotamento, pois mesmo no estado fundido, tendem a manterem-se de certa forma paralelas entre si. Durante o resfriamento e solidificação, as cadeias, já com um certo grau de ordem prévia, podem gerar um maior volume de cristalitos (aumento de cristalinidade).

O copolímero, por possuir dois meros diferentes na sua cadeia principal, tende a ter dificuldade de empacotamento e, portanto, de gerar cristalinidade. Um exemplo típico é a borracha de EPDM que possui meros que individualmente produzem homopolímeros PE e PP. No entanto, o tipo de conformação de cristalização em cada caso é diferente: “ziguezague planar” para o PE e helicoidal para o PP.

Finalmente, os aditivos aparecem como substâncias estranhas ao polímero alojando-se entre suas cadeias dificultando o empacotamento e, portanto, sua cristalinidade. Quando se adicionam plastificantes ao PVC, sua cristalinidade nominal reduz de 10% para zero. Por outro lado, existem aditivos que contribuem para o aumento da cristalinidade.

2.2.6. Transições Térmicas em Polímeros

Uma das características mais importantes dos polímeros – que depende da composição química e da estrutura molecular e

varia de acordo com estas – é a das transições térmicas. Os polímeros apresentam duas transições fundamentais quando aquecidos: temperatura de transição vítrea (*glass transition* - T_g), característica da fase amorfa e temperatura de fusão (*melt transition* - T_m), característica da fase cristalina (MANRICH ET AL., 1997).

De forma bem simplificada e macroscopicamente, pode-se dizer que a temperaturas abaixo de T_g , o polímero apresenta o comportamento mecânico de um vidro, isto é, altamente rígido e frágil (quebradiço), e acima da temperatura de fusão, o polímero funde, tornando-se um líquido. Deve-se ressaltar que nem todos os polímeros apresentam essas duas temperaturas de transição.

A temperatura de transição vítrea (T_g) é uma transição termodinâmica de segunda ordem que ocorre nas regiões amorfas, ou seja, ocorrem mudanças nas variáveis termodinâmicas secundárias. Algumas propriedades (módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, índice de refração, calor específico, etc) mudam com a T_g e, portanto, podem ser utilizadas para a sua determinação (AGNELLI, 2000).

Abaixo de T_g as macromoléculas poliméricas não têm energia interna suficiente para deslocarem-se umas em relação às outras por mudanças conformacionais: abaixo de T_g um polímero amorfo (que tem 100% de suas regiões afetadas por T_g) é vítreo, duro, rígido e quebradiço. Acima de T_g , as regiões amorfas readquirem progressivamente a sua mobilidade, ou seja, as mudanças conformacionais tornam-se possíveis: acima de T_g , em torno de 50°C, os polímeros amorfos apresentam comportamento borrachoso (mole e flexível).

A temperatura de fusão cristalina (T_m) é a média da faixa de temperatura em que durante o aquecimento desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos. As forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina são

vencidas pela energia do sistema destruindo, dessa forma, a estrutura regular do empacotamento atingindo o estado fundido (viscoso). Essa transição só ocorre na fase cristalina e, portanto, só terá sentido para polímeros semicristalinos. A T_m é uma transição termodinâmica de primeira ordem que irá afetar variáveis como o volume específico e a entalpia.

Para termoplásticos cristalinos, geralmente T_m é maior que T_g e pode-se expressar que:

$$(\text{polímeros não simétricos}) \quad 1,4 \leq \frac{T_m}{T_g} \leq 2,0 \quad (\text{polímeros simétricos}) \quad (2.1)$$

T_g e T_m expressos em graus Kelvin.

Na Tabela (2.1) encontram-se alguns valores de temperatura de transição vítrea (T_g) e temperatura de fusão (T_m) para alguns polímeros termoplásticos.

Tabela 2.1 – Valores de T_g e T_m de alguns polímeros termoplásticos (MANRICH ET AL., 1997)

Polímero	T_g (°C)	T_m (°C)
HDPE	-36	135
LDPE	-70	115
LLDPE	-60	125
PP	-3	165
PS	100	*
PVC	81	*
PMMA	105	*
PVA	31	*
PET	80	250
NYLON6**	40	235
NYLON66***	50	265
PTFE (teflon)	-73	325

* não apresenta T_m por ser polímero amorfo

** O polímero é denominado náilon 6 ou poliamida 6, onde 6 é o número de átomos de carbono do aminoácido que poderia ter originado o polímero.

*** O polímero é denominado náilon 66 ou poliamida 66 (ou ainda, poliamida 6,6), onde o primeiro 6 é o número de átomos de carbono da diamina e o segundo 6, é o número de átomos de carbono do diácido.

2.3. GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS

Uma geomembrana é definida como um material sintético ou reforço betuminoso (chapas) de baixa permeabilidade. São utilizadas em aplicações ambientais e geotécnicas assim como em aplicações de transporte (ROLIN E RIGO, 1991).

Também chamadas de “liners” ou “seals” (termo que designa um certo tipo de vedante), as geomembranas são materiais poliméricos ou betuminosos que possuem uma espessura de 0,5 a 5,0 mm (KOERNER, 1991).

Uma geomembrana é essencialmente uma membrana impermeável usada com fundações, solos ou outros materiais relacionados à engenharia geotécnica como parte integrante de um projeto, sistema ou estrutura projetada (ASTM D4439-00).

Como visto acima, uma geomembrana pode ser definida de diferentes formas, no entanto, a maioria das definições consideram-na como um material que interage com o meio ambiente ou com obras geotécnicas tendo como função principal a impermeabilização ou retenção de líquidos.

De acordo com KOERNER (1998) apesar de serem consideradas impermeáveis, as geomembranas poliméricas não são absolutamente impermeáveis. No entanto, se comparadas aos geotêxteis ou aos solos (inclusive argilosos) apresentam valores de permeabilidade extremamente baixos. Em ensaios de transmissividade ao vapor de água, os valores típicos de permeabilidade das geomembranas situam-se na faixa de $0,5 \times 10^{-10}$ a $0,5 \times 10^{-13}$ cm/s. Dessa forma, ressalta o autor que sua função principal é sempre de atuar como barreira para líquidos ou vapores.

Historicamente, as geomembranas foram utilizadas em 1930, embora sua adoção tenha começado em 1940 (ROLLIN E RIGO, 1991). O PVC (Poli Cloreto de Vinila) foi utilizado como “liner” em uma piscina em meados de 1930 (STAFF, 1984). Experiências foram

efetuadas pelo “Bavarian Highway Department” utilizando Polietileno de Baixa Densidade (LDPE) como impermeabilizante após 1930 (BELL & YODER, 1957).

O início da produção de polímeros termofixos deu-se com a invenção da borracha sintética em 1938, sendo que a primeira geomembrana de material de borracha sintética foi utilizada numa lagoa para água potável (KOERNER, 1998).

O uso de geomembranas de PVC teve início no começo dos anos 50 na América do Norte, sendo empregada como camada impermeável em canais. As geomembranas de Polietileno foram desenvolvidas somente na década de 60 na Alemanha (KOERNER, 1990).

Instalações de liners de PVC foram feitas no Canadá, Rússia, Taiwan e na Europa entre 1960 e 1970. O Poli (etileno clorossulfonado) (CSPE) foi desenvolvido nos Estados Unidos e na Europa. Liners de Polietileno foram desenvolvidos na Alemanha oriental e distribuídos para toda a Europa, África, Austrália e América do Norte. Em 1987, mais de 50 milhões de m² foram instaladas mundialmente (ROLLIN E RIGO, 1991).

De acordo com MILANO (1999) o uso de geossintéticos na proteção ambiental no Brasil teve início a partir de 1990. Em 1991, apenas um aterro industrial incorporava proteção sintética.

Atualmente, a situação brasileira apresenta diversas obras que incorporam os materiais geossintéticos, em particular, as geomembranas. Em sua maioria são obras ambientais para armazenamento ou contenção de resíduos onde a geomembrana protege o solo e aquíferos contra contaminação (aterros sanitários e industriais, revestimentos de fundo, impermeabilização de canais, etc). As geomembranas mais utilizadas são as de HDPE (PEAD) e PVC.

Atualmente, as geomembranas são mundialmente conhecidas em face de sua disponibilidade e aplicabilidade. A

contenção e armazenamento de líquidos, sólidos e gases podem ser facilitados quando estas são utilizadas. Exemplos de tais atividades são (KOERNER, 1991):

- a) Líquidos: água potável, industrial, resíduos de água industrial, resíduos de água municipal, líquidos de processos químicos, resíduos químicos líquidos;
- b) Sólidos: lixo radioativo, lixo perigoso, lixo industrial, lixo municipal, lixo hospitalar, lixo de mineração;
- c) Gases: gases de produtos industriais, gases de lixo industrial, gases de aterros sanitários, gases de lixo radioativo, vapor d'água.

Nos aterros sanitários as geomembranas são tipicamente usadas na impermeabilização da base e também no fechamento dos mesmos (cobertura). Uma das vantagens das geomembranas é proporcionar redução da espessura das barreiras nos sistemas impermeabilizantes de fundo dos aterros.

Devido à sua alta resistência química e durabilidade, as geomembranas de PE são mais utilizadas em sistemas de impermeabilização de base e cobertura de aterros sanitários (SHARMA & LEWIS, 1994). De acordo com esses autores, as geomembranas de PVC foram historicamente recomendadas nos Estados Unidos para aplicações em obras de curto prazo (um a cinco anos) devido a incertezas quanto à sua durabilidade em longo prazo. O PVC tem grande aplicação em obras como canais, barragens, túneis e reservatórios. No entanto, PEGGS (1992) ressalta que o PVC tem aumentado sua utilização em obras de longo prazo como aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU) devido ao aumento da aplicação de geossintéticos na área geotécnica. Ademais, ressalta a facilidade de instalação das geomembranas de PVC por serem menos expansivas que as geomembranas de PE e por serem fabricadas em grandes painéis. Outra vantagem citada pelo autor é que o PVC pode

ser soldado simplesmente com a utilização de um solvente, enquanto as geomembranas de PE são soldadas a quente utilizando equipamento especial, o que requer equipe treinada para a instalação. Entretanto, deve-se levar em conta que as soldas químicas (com solventes) de PVC não apresentam um controle de qualidade eficiente em obras ambientais. As soldas duplas por termofusão do HDPE podem ser verificadas em sua totalidade quanto à sua estanqueidade pelo ensaio de pressão de ar. Outro detalhe é que os painéis das geomembranas de HDPE podem chegar a 7,0 m contra 2,40 m das geomembranas de PVC. Isso faz com que o número de soldas das geomembranas de HDPE seja menor que as de PVC.

Evidentemente as geomembranas de PVC e HDPE possuem diversas vantagens que irão variar em função de suas aplicações e da contínua melhoria dos processos de fabricação e instalação que visam melhorar suas características de resistência e de desempenho.

A Tabela (2.2) apresenta os tipos principais de geomembranas existentes. Na Tabela (2.3) encontram-se as vantagens e desvantagens dos principais tipos de geomembranas.

Tabela 2.2 – Tipos Principais de Geomembranas em uso (modificado de KOERNER, 1998 e SHARMA & LEWIS, 1994)

Amplamente Utilizadas	Pouco Utilizadas	Combinações
Polietileno de Alta Densidade (HDPE)	Polietileno Linear de Baixa Densidade (LLDPE)	PVC – Borracha Nitrila
Polietileno Clorossulfonado (CSPE)	Liga de Interpolímero de Etileno reforçado (EIA-R)	PE – EPDM
Polietileno de Densidade Muito Baixa (VLDPE)	Polietileno Clorado Reforçado (CPE-R)	PVC - EVA
Poli (Cloreto de Vinila) – PVC Polipropileno Flexível (f-PP)	Borracha de Propileno Etileno (EPDM)	CPE com ligação cruzada

Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens de Membranas Sintéticas
(BAGCHI, 1990)

Membrana Sintética	Vantagens/Desvantagens
Borracha Butílica	Boa resistência aos raios ultravioletas (UV) e agentes de intempérie; Bom desempenho a altas e baixas temperaturas; Baixo inchamento em água; Baixas características de resistência; Baixa resistência aos hidrocarbonos; Dificuldades de solda.
Polietileno Clorado (CPE)	Boa resistência aos raios ultravioletas (UV) e agentes de intempérie; Bom desempenho a baixas temperaturas; Boas características de resistência; Facilidade de soldagem; Fracas resistência a agentes químicos, ácidos e óleos; Baixa qualidade de soldagem.
Poli(Etileno Clorossulfonado) (CSPE)	Boa resistência aos raios ultravioletas (UV) e agentes de intempérie; Bom desempenho em baixas temperaturas; Boa resistência a agentes químicos, ácidos e óleos; Boa resistência a bactérias; Baixas características de resistência; Apresenta problemas durante a soldagem.
Borracha de Propileno Etileno (EPDM)	Boa resistência aos raios ultravioletas (UV) e agentes de intempérie; Altas características de resistência; Bom desempenho a baixas temperaturas; Baixa absorção de água; Fracas resistência a óleos, hidrocarbonetos e solventes; Baixa qualidade de soldagem.
Polietileno de Alta e Baixa Densidade (HDPE e LDPE)	Boa resistência a diversos agentes químicos; Boas características de resistência e soldas; Bom desempenho em baixas temperaturas; Baixa resistência ao puncionamento.
Poli (Cloro de Vinila) (PVC)	Boa trabalhabilidade; Altas características de resistência (SIC); Facilidade de soldagem; Baixa resistência aos raios UV, ozônio, sulfídeos e elementos de intempérie; Fraco desempenho em altas e baixas temperaturas.

Observação: Essa tabela apresenta limitações. O autor deixa de incluir, por exemplo, a resistência do HDPE aos raios UV e sua trabalhabilidade com relação às emendas; não apresenta as condições que caracterizariam as altas características de resistência do PVC.

A seguir, apresentam-se algumas aplicações das geomembranas (Figuras 2.2 a 2.4).

a) - Agricultura

b) - Canais

c) - Reservatórios

d) - impermeabilização

e) - Silos

f) - Lagoas

Figura 2.2 – Diversas aplicações das geomembranas

Liners para Reservatórios

Coberturas para Reservatórios

Liners para Tanques de Armazenamento Subterrâneo e Sistemas de Drenagens

Barreiras Separadoras de Paredes

Liners de Aterros

Coberturas para Aterros

Figura 2.3 – Aplicações de geomembranas na área ambiental (KOERNER, 1991)

Figura 2.4 – Aplicações de geomembranas na área geotécnica (KOERNER, 1991)

2.4. FABRICAÇÃO

O processo de manufatura de uma geomembrana começa pela escolha de suas matérias-primas que incluem a resina polimérica e vários aditivos como os antioxidantes, cargas e negro de fumo. Os materiais geossintéticos não apresentam 100% de resina pura. Normalmente, a resina primária é formulada com aditivos, cargas e outros agentes a depender da finalidade específica de utilização. Os aditivos sólidos ou líquidos são utilizados como corantes, absorvedores de luz ultravioleta (UV), plastificantes (PVC), retardantes de chama (PE), estabilizantes térmicos, etc. A mistura final poderá ser homogênea ou heterogênea a depender da dispersabilidade dos aditivos com a resina polimérica primária (KOERNER, 1998). A formulação final irá variar conforme os produtos desejados. A Tabela (2.4) apresenta as formulações usuais dos geossintéticos manufaturados.

Tabela 2.4 - Geossintéticos poliméricos comumente usados e suas fórmulas aproximadas (KOERNER, 1998 - Modificado)

Tipo de Polímero	Resina (%)	Cargas (%)	Negro de fumo (%)	Aditivos (%)	Plastificantes (%)
Polietileno	95-97	0	2-3	0.5-1.0	0
Polipropileno flexível	95-97	0	2-3	0.5-1.0	0
PVC sem plastificantes	80	10	5-10	2.0-3.0	0
PVC com Plastificantes	50-70	5-10	1-2	2.0-3.0	25-35
Poliéster	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Nylon	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Poliestireno	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Polietileno Clorossulfonado	40-60	20-40	20-25	0.5-1.0	0

O processamento das matérias para a fabricação das geomembranas seguirá um dos caminhos ilustrados abaixo:

Figura 2.5 – Métodos usados para produção de geomembranas (KOERNER, 1998)

Todas as geomembranas de Polietileno são manufaturadas por método extrusivo. Nesse método, a resina polimérica, o negro de fumo e o pacote de aditivos (antioxidantes e termo-estabilizantes) são carregados pneumaticamente no alimentador de uma extrusora que contém um parafuso com rosca sem fim. A formulação passa sucessivamente através de uma seção de alimentação, de compressão e de dosagem final onde emerge como uma solução fundida na forma da matriz utilizada. Existem duas variações do processo extrusivo para a fabricação de geomembranas. Um deles é chamado de matriz plana onde a formulação polimérica é

“forçada” entre duas calandras paralelas resultando em uma chapa de espessura aproximadamente controlada de 0,75 a 3,0 mm. As larguras variam de 1,80 a 4,60 m e, quando se utilizam duas extrusoras paralelas, as larguras podem ser aumentadas para até 9,10 m. O segundo processo utiliza uma matriz circular onde a formulação polimérica é passada através de duas matrizes concêntricas orientadas verticalmente. Após passar pela matriz, a formulação é transferida para um sistema circular que, finalmente chega a dois rolos superiores que orientam a saída do material para ser cortado longitudinalmente e desdobrado em sua largura total. Através de processos de texturização é possível desenvolver superfícies com alta rugosidade nas superfícies lisas das geomembranas de HDPE e VLDPE. Basicamente, existem três métodos usados para texturizar as geomembranas lisas: coextrusão, intrusão e laminação.

A coextrusão utiliza um agente de sopro na amostra extrudada fundida conduzindo-a de uma pequena extrusora adjacente para a extrusora principal. Quando ambos os lados da placa serão texturizados, são necessárias duas extrusoras pequenas (uma interna e outra externa à extrusora principal). Quando a amostra extrudada dessas extrusoras menores encontra o ar frio, o agente de sopro expande-se se abrindo para a atmosfera e criando a superfície texturizada.

A intrusão de partículas (*impingement*) quentes de PEAD na chapa de polietileno é um segundo método de texturização. As partículas quentes são lançadas sobre a chapa previamente preparada sobre uma ou ambas as superfícies numa segunda operação. As bordas longitudinais das chapas podem ser não texturizadas em até 30 cm de maneira que as medidas de espessura possam ser facilmente acompanhadas.

O terceiro método de texturização de geomembranas de polietileno é feito por laminação de uma espécie de espuma sobre a

chapa manufaturada lisa numa operação secundária. Nesse método, um agente espumante misturado juntamente com o PEAD fundido fornece uma espuma que produzirá uma superfície rugosa que irá aderir à superfície lisa. Se houver necessidade de texturização de ambos os lados da manta, o rolo deve repetir o ciclo descrito para o lado oposto. Nesse método, pode-se também deixar 30 cm das bordas longitudinais sem texturização.

Todas as geomembranas de PVC, CSPE e reforçadas são manufaturadas pelo método de calandragem. Nesse método, todas as composições que irão ser adicionadas à geomembrana (ver Tabela 2.4) são pesadas e misturadas numa câmara (“Banbury type”) ou numa câmara (“Farrel type”). Na fase de mistura, adiciona-se calor para dar início à reação entre os componentes. Após passar pelo misturador, o material é encaminhado por um transportador para um moinho de rolos onde ainda será misturado e moído. Na forma de uma massa contínua, passará através de um conjunto de rolos para formar a chapa final. A calandragem produz geomembranas com larguras de até 2,40 m. Para a produção de larguras maiores (painéis), os rolos são emendados pelo próprio fabricante e, posteriormente, enviados para a obra devidamente dobrados ou podem ser emendados na própria obra.

As geomembranas também podem ser manufaturadas por um método de espalhamento (*spread coating*). Nesse método, o polímero fundido (qualquer que seja sua formulação) é espalhado numa fina camada sobre um material tecido ou ainda, sobre um não-tecido. Geralmente, os espaços da abertura dos poros são insuficientes para permitir a penetração no lado oposto. Dessa maneira, se a camada é requerida em ambos os lados, deve-se virar o material e repetir o processo.

Nos diferentes processos de manufatura descritos acima é importante ressaltar que estes freqüentemente envolvem diferentes empresas. Portanto, há a necessidade de um processo de

comunicação entre estas para que o produto possa atender às suas especificações. KOERNER (1998) ressalta que a maioria dos problemas e enganos surge devido ao grande número de partes envolvidas no processo de fabricação. Torna-se necessário então que o controle de qualidade de fabricação da geomembrana seja garantido na obra onde esta será utilizada.

2.5. ENSAIOS EM GEOMEMBRANAS

Muitas normas e especificações têm sido utilizadas para a realização de ensaios nos geossintéticos, em particular, nas geomembranas. Dessas normas, destacam-se as normas internacionais (ISO), alemãs (DIN), francesas (AFNOR) e americanas (ASTM). No contexto nacional, as normas brasileiras (NBR) encontram-se ainda em fase de elaboração.

Com relação a essa diversidade de normas existentes, deve-se destacar que existem dificuldades de obtenção para algumas e um custo elevado para outras. Dessa forma, surge um questionamento em relação ao tipo específico de normatização a ser utilizada. Evidentemente, isso será sempre uma decisão particular de projeto e os projetistas têm optado pelas normas específicas de seus países. Não obstante, atualmente no Brasil, opta-se pelas normas americanas (ASTM) e pelas normas internacionais (ISO).

Com relação aos tipos específicos de ensaios, vários autores têm sugerido uma diversidade enorme de ensaios para a caracterização das geomembranas.

RIGO & CAZUFFI (1991) ressaltam que a caracterização de uma geomembrana requer dois passos principais: os ensaios de identificação e os ensaios de desempenho (na geomembrana, nas juntas e para estudos de durabilidade). Enquanto o tipo de geomembrana tem uma influência particular na escolha dos

procedimentos de ensaios de identificação, os ensaios de desempenho são mais influenciados pela aplicação particular da geomembrana.

Segundo esses autores, alguns ensaios simples de identificação permitem verificar se o produto entregue no local está de acordo com as especificações.

Os ensaios de desempenho devem demonstrar a capacidade da geomembrana exercer sua função impermeabilizante levando-se em conta as tensões “*in situ*” e as condições ambientais. Esses ensaios podem ser realizados no corpo principal da geomembrana ou nas emendas de construção.

Os ensaios de desempenho nas emendas referem-se à capacidade da geomembrana ser colocada ou unida no campo ou em fábrica, se esta for pré-soldada.

Os objetivos dos ensaios de durabilidade são de controlar a capacidade da geomembrana ou do sistema impermeabilizante (incluindo a geomembrana) de resistir às tensões ao longo do tempo. Geralmente, a essas tensões, somam-se os efeitos sinérgicos de degradação.

Além das informações técnicas sobre as características dos produtos, é necessário que se faça também, um programa de ensaios para receber os produtos em campo.

KOERNER (1998) estabelece que os ensaios de propriedades físicas são importantes na identificação do produto. Segundo o autor, esses ensaios são: espessura, densidade, gramatura, índice de fluidez (MFI), permeabilidade ao vapor de água (WVT) e transmissividade de vapores de solventes (SVT).

De maneira geral, os ensaios físicos e mecânicos são utilizados não apenas para a caracterização do material, mas também para o controle de qualidade e expectativa de comportamento do produto (ver, por exemplo, MAIA, 2001; BUENO, 2003 e VILAR, 2003).

BUENO (2003) ressalta que os ensaios de desempenho, como a compatibilidade química, a resistência à degradação térmica, à radiação UV e microfissuração sob tensão (*stress cracking*) têm tido ênfase no estudo das geomembranas, pois ajudam o projetista a deliberar sobre o desempenho do material ao longo tempo.

O Instituto de Pesquisas de Geossintéticos (GRI) possui especificações internas para a realização de ensaios em geossintéticos. Com relação às geomembranas, as especificações referem-se apenas ao PE. Nestas normas do GRI existem indicações da frequência de amostragem e de teste para o controle de qualidade de fabricação.

A Tabela (2.5) apresenta os ensaios mais comuns realizados nas geomembranas. A seguir, são apresentadas algumas considerações sobre os principais ensaios rotineiramente executados nas geomembranas.

Tabela 2.5 – Ensaios usuais em Geomembranas

ENSAIO	NORMA
Ensaios de Identificação	
Espessura	ASTM D1593, D5199 e D3767
Densidade	ASTM D792, D1505 e D297
Massa por Unidade de Área	ASTM D3776
Ensaio de Tração	ASTM D638, D882 e D751
Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	ASTM D3417 e D3418
Análise Termogravimétrica (TGA)	ASTM D6370 e E2105
Análise Termomecânica (TMA)	ASTM D648 e E831
Índice de Fusão (MFI)	ASTM D1238
Teor de Solventes	ASTM D297
Dureza	ASTM D2240
Extraíveis	ASTM D297 e D3421
Teor de cinzas	ASTM D297
Tempo de Oxidação (OIT)	ASTM D3895
Teor de Negro de Fumo (PE)	ASTM D1603
Dispersão de Negro de Fumo (PE)	ASTM D5596 e D3015
Ensaios de Desempenho	
Resistência ao Rasgo	ASTM D1004, D2263 e D624
Resistência ao Estouro	ASTM D5617
Resistência ao Puncionamento	ASTM D4833 e FTMS 101C
Cisalhamento	ASTM D5321
Fluência	ASTM D5262
Expansão Térmica	ASTM D696
Estabilidade Dimensional	ASTM D1204
Permeabilidade (água)	ASTM E96
Permeabilidade (vapor)	ASTM E96
Ensaios de Desempenho em Emendas	
Ensaio de Cisalhamento	
Ensaio de Descolamento	
Ponto de Escoamento Mecânico	
Pressurização das Emendas	
Aplicação de Ar	ASTM D4437 e D4545
Caixa de Vácuo	ASTM 6392, GM19 e GM14
Plano de Impedância Ultra-Sônico	
Ressonância Ultra-Sônica	
Ensaios de Durabilidade	
Abrasão	ASTM D460 e D2228
Exposição à Intempérie	ASTM D1435
Envelhecimento Térmico	ASTM D573
Exposição ao Calor (Estufa)	ASTM D794 e D5721
Exposição à Radiação UV	ASTM G153, G154 e G155
Resistência Química	EPA 9090, D5747 e D5322
Resistência Biológica	ASTM G22 e G21
Envelhecimento por Ozônio	ASTM D1149
Fissuramento sob Tensão (PE)	ASTM D1693 e D5397

2.5.1. Espessura

A espessura da geomembrana é medida em vários pontos de seu plano. Normalmente utiliza-se o método de ensaio D5199 da ASTM para mantas lisas e o método D5994 para geomembranas texturizadas. Aplica-se uma carga por cinco segundos à geomembrana e mede-se a distância entre os pontos superior e inferior desta sob o efeito da carga. A depender do tipo de geomembrana, haverá uma variação do valor aplicado. Normalmente, a pressão aplicada é de 20 kPa. Caso ocorra suspeita quanto à determinação da espessura, pode-se utilizar uma pressão que varia de 50 a 200 kPa (principalmente para geomembranas de PEAD).

De acordo com SHARMA & LEWIS (1994) as geomembranas possuem espessuras entre 0,5 e 3,0 mm (20 e 120 mils). As geomembranas de PVC usadas em sistemas de contenção de resíduos apresentam espessura característica entre 0,75 mm e 1,0 mm (30 e 40 mils) enquanto as geomembranas de PE apresentam espessuras entre 1,5 a 2,0 mm (60 a 80 mils)

As especificações da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) exigem que toda geomembrana usada em sistema de contenção de RSU de aterros sanitários tenha no mínimo 0,75 mm de espessura com exceção do PEAD que deve possuir pelo menos 1,5 mm de espessura para permitir o processo de soldagem da emenda. A CETESB recomenda geomembranas com espessura mínima de 1,0 mm para municípios até 300 mil habitantes e 2,0 mm para municípios com mais de 300 mil habitantes (MAIA, 2001).

2.5.2. Densidade

A densidade expressa a relação entre o peso específico do produto pelo específico da água sendo, portanto, *adimensional*. Os

métodos mais comuns para a determinação da densidade de uma geomembrana são os métodos D792 (Princípio de Arquimedes) e D1505 da ASTM. O método D1505 é preferível ao D792 principalmente para materiais com massa específica menores que a água. O método D792 utiliza o princípio de Arquimedes (empuxo) e é extremamente rápido e direto. Quando o material apresentar massa específica menor que a água, pode-se utilizar um líquido diferente ou ainda, acrescentar um pequeno peso à amostra para que esta possa ser imersa. O método D1505 geralmente é utilizado para densidades menores que 1.0 (um) e, principalmente para geomembranas de PE. Esse método utiliza um longo tubo de vidro (coluna) com soluções de densidades diferentes (gradiente de densidades): uma com alta densidade na base e outra com baixa densidade no topo. Normalmente, utiliza-se isopropanol e água para medidas de densidade menores que um e, brometo de cálcio e água para medidas de densidade maiores que um. Esferas de densidade conhecida são adicionadas à coluna para obter-se sua curva de calibração. Dessa forma, pequenos pedaços do produto são imersos na coluna verificando-se seu ponto de equilíbrio e, de acordo com a curva de calibração, determinando-se sua densidade.

De acordo com a classificação da ASTM, as resinas de HDPE devem possuir uma densidade superior a 0,941. Contudo, todas as geomembranas comerciais de HDPE utilizam resina de polietileno com densidades que variam de 0,934 a 0,938. Somente pelo acréscimo de negro de fumo e demais aditivos é que a formulação atingirá a densidade de 0,941 ou superior a esta. Dessa forma, o que é chamado de HDPE pela indústria da geomembrana é feito de resina de Poli Etileno de Média Densidade (SHARMA & LEWIS, 1994; KOERNER, 1998; HSUAN & KOERNER, 1998).

De acordo com KOERNER (1998) a densidade de todas as geomembranas poliméricas está compreendida entre 0,85 e 1,5. A Tabela (2.6) apresenta os intervalos das densidades de várias resinas

constituintes das geomembranas de polietileno e da manta manufaturada resultante.

Tabela 2.6 - Intervalos de densidades para vários tipos de geomembranas de polietileno (HALSE ET AL., 1991).

Tipo de PE	Intervalos de densidade da resina	Densidade final do composto
HDPE	0,940-0,970	0,951-0,981
MDPE	0,930-0,940	0,941-0,951
LDPE	0,915-0,930	0,926-0,941
LMDPE	0,900-0,906	0,911-0,917

HALSE ET AL. (1991) ressaltam que a cristalinidade do polímero está diretamente relacionada com a sua densidade. SHARMA & LEWIS (1994) resumem as variações esperadas em várias propriedades com o aumento da densidade do PE. Essas variações estão apresentadas na Tabela (2.7).

Tabela 2.7 - Tendência de comportamento de diversas propriedades relacionadas ao aumento da densidade do PE (SHARMA & LEWIS, 1994).

PROPRIEDADES	TENDÊNCIA DE VARIAÇÃO
TÉRMICAS	
Ponto de Endurecimento	Grande aumento
Viscosidade e Temperatura de Fusão	Aumento
MECÂNICAS	
Espessura	Aumento
Resistência à Tração	Aumento
Resistência à Torção	Aumento
Resistência ao Impacto	Diminuição
Flexibilidade a Baixa Temperatura	Diminuição
QUÍMICAS	
Resistência ao " <i>Stress Cracking</i> "	Diminuição
Permeabilidade	Diminuição
Resistência Química	Aumento

2.5.3. Índice de Fluidiez (MFI) e Valor K

O ensaio de Índice de Fluidiez (*Melt Flow Index* - MFI) é usado para medir a vazão por extrusão do polímero sob pressão e temperatura específicas. Este é um procedimento importante no processamento da geomembranas de PE e é rotineiramente realizado para controle de qualidade de fabricação (HALSE ET AL., 1991).

O ensaio refere-se à condição de fluxo do polímero no seu estado fundido. É utilizado tanto para a resina quanto para a geomembrana. Para a realização do ensaio utiliza-se o método D1238 da ASTM. Esta norma inclui a definição do tipo de aparelho a ser empregado, com as dimensões do orifício para a extrusão do polímero e as condições de ensaio para cada polímero em termos da massa que irá forçar a extrusão do polímero e da temperatura do cilindro. Para o polietileno o ensaio padrão é realizado com uma massa de 2,16 Kg e temperatura de 190°C (condição “E” da norma). Os resultados do ensaio são geralmente apresentados em gramas por 10 minutos, e o valor do MFI para o PE está geralmente compreendido entre 0,2 e 1,0 g/10 minutos. O valor do MFI é considerado uma forma de avaliação indireta do peso molecular dos polímeros termoplásticos. No entanto, os valores do Índice de Fluidiez devem ser comparados apenas entre diferentes amostras de um mesmo polímero (KOERNER, 1998; AGNELLI, 2000).

Um valor alto de MFI indica que o polímero ensaiado apresenta peso molecular baixo, e vice e versa. Se a resina apresentar alguma impureza ou inconsistência, isto será refletido no ensaio de MFI (HALSE ET AL., 1991; SHARMA & LEWIS, 1994; KOERNER, 1998).

KOERNER (1998) ressalta que o ensaio também pode ser realizado com uma massa de 5,0 Kg e, conseqüentemente, medir-se a razão da taxa de fluxo (*Flow Rate Ratio* - FRR), isto é, a razão entre o valor de MFI obtido para a massa de 5,0 Kg pelo valor obtido para a

massa de 2,16 Kg na mesma temperatura. O valor do FRR indica a dispersão da curva de distribuição do peso molecular do polímero.

O ensaio de MFI não é um ensaio preciso para polímeros contendo plastificantes como o PVC.

São comuns as especificações de resinas de PVC por meio de sua viscosidade inerente e valor K uma vez que seu peso molecular é normalmente caracterizado por parâmetros relacionados à viscosidade do polímero em solução diluída. A viscosidade inerente é a especificação mais comumente utilizada nos Estados Unidos. Sua determinação é feita pela determinação dos tempos de diluição da ciclohexanona pura e de uma solução de 0,2 g de resina em 100 mL nesse solvente, segundo a ASTM D1243. Por meio dos valores de tempo de diluição são calculadas as viscosidades relativa e inerente por meio das equações (2.2) e (2.3).

$$\eta_{rel} = \frac{t}{t_o} \quad (2.2)$$

$$\eta_{inh} = \ln \frac{\eta_{rel}}{c} = \text{índice de viscosidade} \quad (2.3)$$

onde η_{rel} e η_{inh} representam as viscosidades relativa e inerente, respectivamente, t e t_o representam os tempos de diluição da solução e do solvente puro em um viscosímetro padronizado, respectivamente, e “c” é a concentração da solução avaliada.

Os produtores de PVC europeus, por sua vez, preferem especificar o peso molecular do PVC por meio de um parâmetro conhecido como valor K. Esse parâmetro é fortemente dependente da natureza do solvente, mas também influenciado pela concentração e temperatura de teste e relaciona-se com a viscosidade relativa e a concentração da solução avaliada segundo a seguinte expressão:

$$k = 1000 \cdot \frac{1,5 \log \eta_{rel} - 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{c} + 2 + 1,5 \log \eta_{rel} \right) \times 1,5 \log \eta_{rel}}}{150 + 300c} \quad (2.4)$$

desde que “c” seja a concentração da solução expressa em g/L.

Os métodos ISO 174, DIN 53726 e NBR 13610 (baseados no método de Fikentscher) especificam a determinação do valor K em ciclohexanona (na concentração de 0,5 g de PVC para 100 mL de solvente) na temperatura de 25°C. Alguns laboratórios, por sua vez, preferem a determinação do valor K a partir de soluções de 1,0 g de PVC em 100 ml de ciclohexanona a 25 ou 30°C, o que leva a valores similares mas não idênticos. Outros métodos especificam nitrobenzeno como solvente e temperatura de 30°C (NUNES ET AL., 2002).

Para o PVC, o valor K varia de 45 (PVC de baixo peso molecular) a 78 (PVC de alto peso molecular). A Figura (2.6) apresenta um gráfico em que os dados de valor K e peso molecular numérico médio são correlacionados.

Figura 2.6 - Relação entre o valor K e o peso molecular numérico médio de resinas de PVC (TITOW, 1984)

2.5.4. Massa por Unidade de Área

A massa por unidade de área é uma propriedade física comumente usada para caracterizar o peso da geomembrana. Sua medida é geralmente feita de acordo com a ASTM D3776 (RIGO & CAZZUFFI, 1991). Para KOERNER (1998) a massa por unidade de área é simplesmente chamada de peso (*SIC*). De acordo com a norma D3776 da ASTM, a massa por unidade de área é determinada pela razão de sua massa pela respectiva área da amostra. Os resultados são geralmente expressos g/m^2 . As amostras a serem ensaiadas devem possuir área mínima de 100 cm^2 . Normalmente, utilizam-se amostras de $(10 \times 10) \text{ cm}$ em número mínimo de 5 amostras obtendo-se para estas um valor médio.

2.5.5. Permeação ao Vapor de Água (WVT)

Uma vez que as geomembranas não são materiais impermeáveis, torna-se necessário a avaliação de suas características de permeação. O ensaio específico (WVT) é realizado de acordo com a ASTM E96 e utiliza, basicamente, a geomembrana como uma camada que ficará em contato com dois ambientes com umidades relativas diferentes. Utiliza-se para tanto, um copo de alumínio com água ou material que absorva umidade (normalmente CaCl_2). O conjunto é deixado em ambiente controlado (temperatura e umidade relativa do ar). Quando se utiliza água, a umidade relativa dentro do copo será de 100% e no ambiente será de um valor menor. Dessa forma, pode-se monitorar a perda de vapor de água pela geomembrana ao longo do tempo. Quando se utiliza um material dessecante, o inverso ocorre, ou seja, a umidade relativa do ar dentro do copo será nula e, haverá com o tempo, transferência de vapor de água para dentro do copo de alumínio. Esse tipo de ensaio normalmente tem uma duração

mínima de sete dias. Através dos resultados obtidos é possível calcular-se os valores de WVT, permeabilidade e permeação (ver, por exemplo, KOERNER, 1998).

2.5.6. Permeação a Vapores de Solventes (SVT)

Na presença de líquidos diferentes da água, principalmente voláteis, os vapores gerados irão permear a geomembrana com taxas diferenciadas, principalmente com relação aos vapores de água. Normalmente, utiliza-se o ensaio E96 (ASTM) com a diferença de que no lugar da água utiliza-se o solvente específico. Para aplicações locais, deve-se fazer a avaliação dos valores de SVT com o resíduo local. O ensaio deve ser realizado quando a geomembrana for utilizada em aplicações que possam gerar gases (aterros industriais, de resíduos químicos e radioativos), coberturas de aterros sanitários, etc.

2.5.7. Propriedades de Tração

As propriedades de tração de materiais poliméricos são avaliadas através de ensaios de tensão *versus* deformação. As propriedades avaliadas dependerão do tipo específico de geomembrana: tensão e deformação no escoamento (geomembranas semicristalinas), tensão e deformação na ruptura (geomembranas não reforçadas), tensões em deformações específicas para geomembranas de PVC (geralmente 100 e 200%), etc.

Os ensaios de tração podem ser utilizados no controle de qualidade durante a fabricação, na comparação entre produtos diferentes, na identificação, na avaliação de mudanças no

comportamento mecânico após incubação e para avaliar mudanças no comportamento mecânico após envelhecimento.

A maioria dos métodos de ensaios utiliza esforços uniaxiais, ou seja, aplicam-se esforços de tração ao longo de um eixo apenas. Os ensaios de tração uniaxiais são realizados em equipamentos que permitem altas taxas de deformação das amostras ensaiadas. Essas, por sua vez, são presas por garras (geralmente pneumáticas) na base e no topo de seu comprimento. Após aplicação da solicitação, o material deforma-se sob taxa constante até atingir a ruptura ou as faixas de deformação de interesse. Outro ensaio que pode refletir melhor a situação da manta quando solicitada é o ensaio de tração multiaxial que avalia as propriedades de tração em eixos múltiplos simultaneamente.

Basicamente, existem três tipos de ensaios de tração: ensaios índices, ensaio de faixa larga e ensaio multiaxial.

- *Ensaio Índice:* Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova com dimensões relativamente pequenas quando comparados às mantas entregues em obra. Esse tipo de ensaio visa o controle e a garantia de qualidade do material servindo também, para identificação do mesmo. Os ensaios são extremamente simples e normalmente utilizam-se os procedimentos das normas ASTM D638, D882 e D751. A norma D638 também faz referência às normas específicas para ensaios em geomembranas reforçadas. O corpo de prova utilizado é o tipo IV para ensaios em membranas não reforçadas e espessuras superiores a 1,0 (um) milímetro (Figura 2.7).

A Figura (2.8) ilustra o comportamento tensão x deformação de diferentes geomembranas. Nota-se que o HDPE, assim como o PP, apresenta um ponto de escoamento bem definido para pequenas deformações (em torno de 15%). Como esse tipo de ensaio avalia os valores de tensão de acordo com os valores

iniciais da amostra, o ensaio de tração para o PEAD apresenta o comportamento ilustrado na Figura (2.9). À medida que ocorre a solicitação do corpo de prova, a região central (largura) irá diminuindo (alongando-se) fazendo com que os valores de tensão diminuam após o escoamento devido à taxa constante de deformação. Prosseguindo a solicitação, os valores de tensão irão aumentando novamente devido ao rearranjo que ocorre no material (nova orientação de cadeias moleculares). Na ruptura os valores de tensão serão maiores do que na fase de escoamento e a deformação atinge valores de 700 a 1200%.

Outros materiais como o PVC, CSPE, CPE e Borracha Butílica não apresentam um escoamento inicial. Esses materiais caracterizam-se por deformações da ordem de 200 a 500%. Note-se que a resistência à tração do PVC é maior que a desses materiais e normalmente atinge valores de 18 a 20 MPa. O comportamento da geomembrana betuminosa reforçada é delimitado pela resistência do reforço, ou seja, apresenta um patamar pequeno de deformação para um valor característico de resistência. A Figura (2.10) ilustra um ensaio de tração em andamento.

Figura 2.7 – Corpo de prova para ensaio de tração (Tipo IV - D638)

Figura 2.8 – Comportamento tensão x deformação de diferentes geomembranas (Apud RIGO & CAZZUFFI, 1991)

Figura 2.9 – Curva de tração para o PEAD

Figura 2.10 – Ensaio de tração em uma geomembrana de PEAD

Na Tabela (2.8) estão apresentados os detalhes dos ensaios índices de acordo com KOERNER (1998). No entanto, ressalta-se que apesar do autor referenciar a norma D882 para o PVC, esta só deve ser utilizada para espessuras menores que 1,0 mm independente do produto.

Tabela 2.8 - Detalhes dos métodos de ensaios recomendados para geomembranas não reforçadas (KOERNER, 1998 - modificado)

Geomembranas	HDPE	VLDPE; PP	PVC
Ensaio de tração (ASTM)	D638	D638	D882
Forma do corpo de prova (cp)	Gravata	Gravata	Tira
Largura da seção (mm)	6.3	6.3	25
Comprimento do cp (mm)	115	115	150
Comprimento inicial (Lo) (mm)	33	33	50
Velocidade de ensaio	50 mm/min	50 mm/min	500 mm/min
Resistência (MPa)	Força/($b \times e$)	Força/($b \times e$)	Força/($b \times e$)
Deformação (mm/mm)	Along/33	Along/33	Along/50
Módulo de Elasticidade (MPa)	Do gráfico	Do gráfico	Do gráfico
Corpos de Prova Ensaçados	5 (2 direções)	5 (2 direções)	5 (2 direções)
Espessura (mm)	$1 < e < 4$	$1 < e < 4$	$e < 1$

b = largura da amostra em (mm), e = espessura da amostra (mm)

- *Ensaio de Faixa Larga:* A principal crítica ao ensaio índice descrito anteriormente é o fato de sua contração na região central do corpo de prova fornecer um comportamento unidimensional que não ocorre em situações de campo. Dessa forma, utilizam-se corpos de prova com dimensões maiores. O ensaio é realizado de acordo com a ASTM D4885 e as dimensões dos corpos de prova foram adaptadas dos ensaios de geotêxteis: 200 x 200 (mm). Na realização do ensaio, a direção que será solicitada ficará com apenas 100 mm devido a uma parte da amostra que ficará presa nas garras nas extremidades. A taxa de deformação recomendada pela norma é de apenas 1mm/min para tentar simular melhor as condições de deformação da geomembrana em obra. No entanto, esta taxa fará com que os ensaios se tornem extremamente demorados. Um ensaio com uma geomembrana de PVC que atinge a ruptura com 400% de deformação demoraria cerca de 8 horas. Para o HDPE que apresenta cerca de 1000% a 1200% na ruptura, o ensaio levaria até 20 horas. Ressalta-se que, na prática, dificilmente se consegue alcançar uma deformação da ordem de 1000% para o HDPE nesse ensaio. Há uma limitação dos equipamentos. Dessa forma, fica claro que esse tipo de ensaio visa avaliar o desempenho das geomembranas sendo totalmente inadequado para o controle de qualidade. Com relação à taxa de deformação, a ASTM D4885 ressalta que estas poderão ser alteradas em função das análises a serem executadas. A Figura (2.11) ilustra um ensaio de faixa larga em uma geomembrana de HDPE.

Figura 2.11 – Ensaio de faixa larga em um geomembrana de PEAD

- *Ensaio Multiaxial (Axi-Simétrico) de Tração:* De acordo com KOERNER (1998) existem situações nas quais o comportamento de tração da geomembrana mobiliza estados de solicitações não-planas como deformações que podem ocorrer abaixo das geomembranas. Geomembranas usadas em cobertura de aterros sanitários podem apresentar esse comportamento pelo fato de o resíduo sólido vir a apresentar recalques diferenciais. Em laboratório pode-se modelar essa situação colocando-se a geomembrana em um recipiente vazio para posterior aplicação de pressão sobre a mesma utilizando-se água para tanto (Figura 2.12). O procedimento para o ensaio é feito de acordo com a ASTM D5617. O corpo de prova deve possuir um diâmetro mínimo de 450 mm. O equipamento propicia aplicação de pressão e leitura de deflexão. A pressão mínima aplicada é de 690 kPa. Os resultados obtidos são de

pressão aplicada e deflexão no ponto central da geomembrana. Admite-se deformação esférica p/ o cálculo desses valores. Resultados desse ensaio usando um recipiente com diâmetro de 600 mm e velocidade de deformação de 7,0 kPa/min são apresentados por KOERNER (1998). As geomembranas de HDPE como as de CSPE-R apresentaram deformações relativamente baixas para altas tensões, enquanto que as geomembranas de VLDPE e PVC apresentaram deformações relativamente altas.

Figura 2.12 – Equipamento para ensaio de tração axi-simétrico (KOERNER, 1998)

A Tabela (2.9) seguinte apresenta um comparativo dos resultados de ensaios de tração obtidos em algumas geomembranas.

Tabela 2.9 - Valores comparativos dos ensaios de tração (KOERNER, 1998 – modificado)

PEAD (HDPE) 1,5 mm	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	$\sigma_{\text{últim}}$ (MPa)	ε (%)
ASTM D638 (Tipo IV)	18,60	17	330	13,80	500
ASTM D4885 (Faixa Larga)	15,90	15	450	11,00	400
ASTM D5617 (Multiaxial)	23,50	12	720	23,50	25
PVC 0,75 mm	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	$\sigma_{\text{últim}}$ (MPa)	ε (%)
ASTM D638 (Tipo IV)	21,00	480	31	20,70	480
ASTM D4885 (Faixa Larga)	13,80	210	20	13,80	210
ASTM D5617 (Multiaxial)	14,50	100	100	14,50	100
PEDML (VLDPE) 1,0 mm	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	$\sigma_{\text{últim}}$ (MPa)	ε (%)
ASTM D638 (Tipo IV)	8,30	500	76	8,30	500
ASTM D4885 (Faixa Larga)	7,60	400	69	7,60	400
ASTM D5617 (Multiaxial)	10,30	75	170	10,30	75
PECS-R (CSPE-R) 0,90 mm	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	$\sigma_{\text{últim}}$ (MPa)	ε (%)
ASTM D638 (Tipo IV)	54,50	19	330	5,70	110
ASTM D4885 (Faixa Larga)	31,00	23	300	28,00	79
ASTM D5617 (Multiaxial)	31,00	13	350	31,00	13

$\sigma_{\text{máx}}$ = Resistência à tração no escoamento; $\sigma_{\text{últim}}$ = Resistência à tração na ruptura;
 ε = deformação específica; E = módulo de elasticidade inicial

KOERNER (1998) afirma que o ensaio de faixa larga fornece resultados mais orientados para projetos do que os resultados das propriedades índices: quando condições de deformação plana são assumidas no projeto (como no caso do cálculo

de estabilidade de taludes). Com relação aos valores do ensaio de tração multiaxial, o autor chama a atenção para as diferenças observadas em relação aos outros ensaios enfatizando que o modelo apropriado da situação de campo é absolutamente necessário se se vai utilizar a concepção de projeto por função.

2.5.8. Emendas de Geomembranas

A união de rolos e painéis de geomembranas resulta em emendas que podem apresentar resistência menor do que a própria geomembrana. Segundo REDDY & BUTUL (1999) essas diferenças ocorrem devido à concentração de tensão resultantes da geometria da emenda. Diferenças de resistência também podem ser verificadas quando se comparam as emendas feitas em campo e as emendas realizadas em fábrica. Estas últimas possibilitam um maior controle de qualidade e em alguns casos, pode-se reduzir a quantidade de emendas em campo. Atualmente, através de ensaios destrutivos, é possível efetuar um maior controle da resistência das emendas em campo. As emendas das geomembranas de polietileno são realizadas em campo e as de PVC, em sua maioria, em fábrica. As características das emendas são função da técnica utilizada, de sua geometria, da resina polimérica e das tensões residuais nas emendas.

O controle de qualidade das emendas em campo deve ser o mais rigoroso possível, uma vez que estas constituem os pontos críticos dos sistemas de impermeabilização. VILAR (2003) ressalta que, em função da reduzida permeabilidade desses materiais, os aspectos determinantes de seu comportamento serão as fugas e os vazamentos e não a permeabilidade. Vazamentos podem ocorrer através de emendas mal feitas (em campo ou em fábrica), orifícios resultantes da fabricação, perfurações por manuseio e instalação inadequada ou devido a solicitações sem serviço.

Existem diferentes métodos de realização das emendas. Esses métodos podem ser térmicos ou químicos: extrusão térmica (plana ou filete), fusão térmica (cunha quente ou ar quente), emenda química (fusão e fusão química com cola encorpada) e emenda por adesão (adesivo químico ou adesivo de contato). A Figura (2.13) ilustra os tipos de técnicas de emenda utilizadas em geomembranas.

Figura 2.13 - Diferentes técnicas de emendas em geomembranas (KOERNER, 1998)

A emenda por extrusão é utilizada somente para o polietileno e utiliza polímero fundido nos contatos entre as mantas que serão unidas. Conseqüentemente, ocorre o aquecimento e o derretimento das mantas que se solidarizam após o completo resfriamento. Quando o material fundido é colocado sobre a borda da emenda, a técnica é chamada de extrusão filete e quando é colocado entre as duas geomembranas, de extrusão plana. A extrusão filete é utilizada para locais de difícil acesso, trechos com geometria

complicada, soldas de pequenos comprimentos e reparos ou reforços sobre as emendas.

As emendas por fusão térmica utilizam uma cunha quente ou aplicação de ar quente. Na utilização da cunha quente, o aquecimento é feito por uma resistência elétrica que irá fundir as membranas na região de emenda. O processo se completa após aplicação de pressão por rolos. As soldas poderão ser simples ou duplas (quando duas emendas paralelas forem executadas). No caso de emendas duplas, deixa-se um espaço livre entre estas para verificação das condições de estanqueidade da emenda. O método de ar quente utiliza um aquecedor para injetar ar quente entre duas superfícies afim de fundi-las e, posteriormente, uni-las através da aplicação de pressão. As emendas também poderão ser simples ou duplas. Os processos térmicos também são aplicáveis a membranas de PVC.

Os métodos de fusão química utilizam produtos químicos líquidos e aplicação de pressão para unir as membranas. Na fusão química com cola encorpada, a resina polimérica é dissolvida e incorporada ao produto químico (cola) para aumentar a viscosidade da solução e impedir a eventual fuga de componentes voláteis do produto. No processo de adesão, aplica-se um agente dissolvido e aderente (diferente da geomembrana) nas superfícies a serem unidas. A aderência torna-se um elemento adicional ao sistema. No caso da adesão de contato, um agente químico de união é aplicado nas superfícies onde será efetuada a emenda. Após atingirem um ponto ideal de liga, sobrepõem-se as superfícies e, posteriormente, um rolo aplicará pressão no conjunto para efetuar a união da emenda. Os processos de cola, proporcionados por fusão química ou pela aplicação de adesivos, não são aplicáveis a membranas de polietileno.

A Tabela (2.10) apresenta a compatibilidade entre as técnicas de emendas e os diferentes tipos de geomembranas.

Tabela 2.10 – Métodos possíveis de emendas de campo para vários tipos de geomembranas (KOERNER, 1998)

Método de Emendas	Tipo de Geomembrana						
	HDPE	VFPE	PP	PP-R	PVC	CSPE-R	EIA-R
Extrusão (filete e plana)	A	A	A	A	n/a	n/a	n/a
Fusão Térmica (cunha e ar quente)	A	A	A	A	A	A	A
Fusão Química (química e encorpada)	n/a	n/a	n/a	n/a	A	A	A
Adesiva (química e contato)	n/a	n/a	n/a	n/a	A	A	A

A = método aplicável; n/a = método não aplicável

VFPE inclui geomembranas de VLDPE, LLDPE e LDLPE

A execução das emendas é um processo controlado rotineiramente, desde as etapas iniciais, até o complemento do serviço. Nesse controle, executam-se emendas experimentais para a verificação do ajuste do método de ensaio e para o treinamento da equipe. Verifica-se também, a resistência das emendas, que deve ser compatível com a resistência da geomembrana e realizam-se testes de estanqueidade e de continuidade. Estes testes são realizados *in situ* em grandes porções das emendas e envolvem a aplicação de ar comprimido em emendas duplas (deve-se acompanhar a manutenção da pressão de ar já que uma queda desta indica algum vazamento), a aplicação de jatos de ar (com o intuito de separar as membranas soldadas) e métodos elétricos e de ultra-som (VILAR, 2003).

Os principais ensaios de resistência das emendas são os ensaios de descolamento (*peel test*) e de resistência ao cisalhamento. Estes ensaios são normalmente realizados de acordo com as prescrições das normas D4437 e D4545 da ASTM. Outras normas bastante utilizadas são a ASTM D6392 e a GM19. Normalmente utiliza-se uma pequena amostra (25 mm de largura) da emenda para

a realização do ensaio de cisalhamento e descolamento. O ensaio de cisalhamento nada mais é do que um ensaio de tração na região da emenda. As garras são colocadas a uma determinada distância das emendas efetuando-se então a sollicitação. No caso de descolamento, o ensaio é realizado após desprender-se uma pequena parte das emendas a fim de se verificar a força necessária para separá-las. A Figura (2.14) ilustra o esquema de sollicitação das emendas nesses ensaios.

Figura 2.14 – Detalhes dos ensaios de cisalhamento e descolamento (GIROUD, 1984)

REDDY & BUTTUL (1999) ressaltam que os alongamentos também devem ser avaliados já que a ruptura deve ocorrer fora da emenda devido à soldagem imprópria ou superaquecimento.

O superaquecimento aumenta a probabilidade do fissuramento sob tensão adjacente à geomembrana devido ao consumo de antioxidante e aumento da oxidação e cristalinidade. Quando ocorre o descolamento, pequenas fendas podem ocorrer numa geomembrana soldada incorretamente reduzindo sua resistência ao fissuramento sob tensão em até 70% (PEGGS, 1997). O mesmo autor afirma que no ensaio de resistência ao cisalhamento, a ruptura sempre ocorrerá na membrana adjacente e não na emenda uma vez que a união da emenda é muito mais forte do que a

membrana isolada. Portanto, não é possível obter informações sobre a resistência das emendas (SIC).

Essa afirmação só terá veracidade se as emendas forem bem executadas e não tiverem sofrido algum dano mecânico ou perda de sua resistência. Independente do aquecimento da emenda, esta sempre romperá com um baixo valor de deformação. Portanto, somente o alongamento cisalhante deve ser usado ou pelo menos levado em consideração. Os alongamentos cisalhantes devem exceder 100% da distância entre a borda da emenda e a garra mais próxima. O problema que ocorre no ensaio de cisalhamento também ocorre no ensaio de descolamento, ou seja, a ruptura sempre ocorrerá na membrana isolada já que a união é mais resistente e, portanto, nenhuma informação sobre a emenda é obtida.

O ensaio de descolamento é mais eficiente uma vez que fornece informação sobre o critério mínimo exigido para resistência da emenda (sem separação) e o efeito da solda sobre a geomembrana adjacente (sem perda de ductibilidade). Assim, na avaliação de uma geomembrana, somente o ensaio de descolamento é suficiente para fornecer as informações requeridas. Para geomembranas feitas de materiais diferentes de PEAD, a resistência ao descolamento é de aproximadamente 1 a 3 kN/m e a resistência à tração varia de 4 a 70 kN/m. A resistência ao cisalhamento é de aproximadamente 80% a 90% do valor da resistência à tração. Isso implica que a emenda é o ponto mais fraco da geomembrana. Contudo, para geomembranas de PEAD, a resistência ao descolamento e ao cisalhamento é pelo menos igual ao valor da resistência da geomembrana. Dessa forma, a ruptura ocorrerá mais provavelmente na manta isolada do que na emenda (PEGGS, 1997; REDDY & BUTUL, 1999).

Geomembranas extremamente reforçadas apresentam resistências menores ao descolamento do que geomembranas não reforçadas. A prevenção é feita adotando-se para as geomembranas

muito reforçadas, larguras maiores de emendas do que para geomembranas levemente reforçadas (GIROUD, 1984).

Maiores detalhes e informações sobre os métodos e ensaios em emendas de geomembranas podem ser encontrados em SHARMA & LEWIS (1994), PEGGS (1997), KOERNER (1998) e REDDY & BUTTUL (1999). A norma GM19 do GRI (*Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes*) especifica critérios diferentes desses apresentados anteriormente e tem sido utilizada como referência para ensaios de emendas em geomembranas de HDPE.

2.5.9. Resistência ao Rasgo

A resistência ao rasgo das geomembranas pode ser avaliada por diferentes métodos de ensaio: ASTM D2263, D1004, D751, D1424, D2261 e D1938.

A norma D2263 (ensaio de rasgo trapezoidal) pode ser recomendada em alguns casos. Nesse tipo de ensaio, o corpo de prova possui a forma de um trapézio com 100 mm de um lado e 25 mm do lado oposto. O comprimento da amostra é de 75 mm. Para a avaliação da resistência ao rasgo, faz-se um pequeno corte de 13 mm no lado com 25 mm. A amostra é então presa a uma garra num equipamento de tração onde será solicitada nas extremidades do lado que possui o corte. Quando o ensaio se inicia, o rasgo irá propagar-se do menor para o maior lado. A resistência ao rasgo é o valor correspondente ao máximo valor de carga aplicada.

Outro ensaio bastante utilizado é o da norma D1004 que, similarmente ao ensaio D2263, utiliza um corpo de prova que apresenta na região central um ângulo de 90 graus (Figura 2.15). Com uma separação de uma polegada, as garras são presas nas

extremidades do corpo de prova. Ao aplicar-se o carregamento, o rasgo começa a propagar-se no centro da amostra.

Para certas geomembranas não reforçadas com pequena espessura, a resistência ao rasgo é relativamente baixa (18 a 130 N). Esses valores podem causar problemas às geomembranas principalmente durante manuseio e instalação uma vez que a geomembrana pode ser perfurada ou danificada por objetos pontiagudos. Esse problema pode ser superado aumentando-se a espessura das geomembranas. Os valores de resistência ao rasgo de membranas reforçadas são significativamente maiores (90 a 450 N).

Figura 2.15 – Corpo de prova para ensaio de rasgo (ASTM D1004)

A Tabela (2.11) apresenta valores típicos de resistência ao rasgo de acordo com a ASTM D1004.

Tabela 2.11 - Intervalos típicos de resistência ao rasgo para várias geomembranas de acordo com a norma ASTM D1004 (SHARMA & LEWIS, 1994)

Geomembrana	Espessura (mm)	Resistência ao Rasgo (N)
PEAD (HDPE)	1,5	182-204
PEAD (HDPE)	2,0	227-272
VLDPE	1,0	68-91
VLDPE	1,5	114-136
PVC	0,5	27-36
PVC	1,0	45-55

2.5.10. Resistência ao Puncionamento

Quando colocadas sobre solos que contêm pedras, afloramentos de raízes ou outro tipo de protuberância, a geomembrana poderá ser puncionada durante sua instalação bem como ao longo de sua vida útil (KOERNER, 1998). Na fase de instalação, a geomembrana poderá ser puncionada também por equipamentos, maquinários ou ainda sofrer ação de vandalismo quando descoberta. Durante sua vida útil, a geomembrana poderá ser puncionada pela subsidência do solo de base e eventual perfuração criando fendas e buracos na manta que facilitarão o fluxo pela mesma. Dessa maneira, a análise do puncionamento torna-se de vital importância para se tentar minimizar os efeitos danosos de vazamentos pela manta (FROBEL & RIGO, 1991; KOERNER, 1998).

De acordo com SPARGUE & FROBEL (1990) a ruptura por puncionamento ocorre no campo devido a dois mecanismos: puncionamento da zona 1 e puncionamento da zona 2 (Figura 2.16). O ensaio de punção usado em projeto deve então simular ambos os mecanismos.

Figura 2.16. Mecanismos de deformação de geomembranas sob carga pontual (SPARGUE & FROBEL, 1990).

SHARMA & LEWIS (1994) ressaltam a importância da análise da resistência ao puncionamento em sistemas de contenção de resíduos. Nessas obras, a camada drenante (solo granular) é colocada acima da geomembrana. Após aplicação de cargas externas (equipamentos), ou simplesmente pela ação do peso próprio, poderá ocorrer o puncionamento da manta causando vazamentos na mesma.

Existem dois tipos de ensaios para a verificação da resistência ao puncionamento das geomembranas: ensaio índice e de desempenho. O ensaio índice é realizado em amostras de pequenas dimensões e serve para o controle de qualidade das geomembranas. São ensaios rápidos, baratos e de fácil execução. No entanto, os resultados não são utilizados na previsão da capacidade de um geossintético resistir a tensões de instalação e a condições de serviço. Os ensaios de desempenho procuram simular em laboratório as solicitações que o geossintético experimentará em obra. Esses ensaios são lentos, caros e, algumas vezes, difíceis de serem executados. No entanto, são necessários na previsão do comportamento de campo e são freqüentemente utilizados nos projetos (FROBEL & RIGO, 1991).

O principal ensaio índice é o da ASTM D4833. Nesse ensaio, a amostra é colocada em um molde cilíndrico vazado de 45 mm de diâmetro. Esta montagem é então levada a uma prensa de ensaio de compressão. O puncionamento da amostra é obtido pela aplicação de carga de uma barra puncionadora de 8 mm de diâmetro com a extremidade do fundo chanfrada no centro da geomembrana. A velocidade de aplicação da carga recomendada é 300 mm/min. A resistência ao puncionamento é tomada como a carga máxima registrada durante o ensaio. Os valores de resistência ao puncionamento, para geomembranas não-reforçadas, estão geralmente compreendidos entre 50 e 500 N e para geomembranas reforçadas entre 200 e 2000 N. A presença de geotêxteis acima ou abaixo de geomembranas não-reforçadas aumenta consideravelmente

sua resistência ao puncionamento. A Tabela (2.12) apresenta valores de resistência ao puncionamento para várias geomembranas baseados na norma da ASTM D4833 (SHARMA & LEWIS, 1994).

Outro ensaio índice geralmente citado na literatura é o método de ensaio FTMS (Federal Test Method Standard) 101C (método 2031 ou método 2065). Os ensaios de desempenho utilizam o princípio do ensaio tração multiaxial e de pressão hidrostática baseado no ensaio de estouro. Maiores detalhes desses ensaios podem ser encontrados em FROBEL & RIGO (1991).

Tabela 2.12 - Resultados típicos de ensaios ao puncionamento para várias geomembranas poliméricas (SHARMA & LEWIS, 1994)

Geomembrana	Espessura (mm)	Resistência à Punção (N)
PEAD (HDPE)	1,5	318-363
PEAD (HDPE)	2,0	408-477
VLDPE	1,0	227-295
VLDPE	1,5	340-386
PVC	0,5	Não avaliado
PVC	1,0	Não avaliado

2.5.11. Resistência de Interface

Em diversas aplicações de impermeabilização ou de contenção de resíduos, as barreiras impermeabilizantes serão aplicadas em superfícies inclinadas. A necessidade de se ganhar espaço tem feito com que os projetos adotem taludes cada vez mais íngremes resultando em cuidados adicionais da concepção de projeto frente à estabilidade da barreira em si e do resíduo. Conseqüentemente, torna-se necessário a avaliação das propriedades de resistência da interface entre a geomembrana e a superfície inclinada. A geomembrana poderá estar em contato diretamente com o solo, outro material geossintético (geotêxtil, geogrelha, geodreno, etc), liners argilosos e/ou camadas drenantes. Em qualquer desses

casos, há a necessidade de se avaliar a resistência de interface que ocorre nesses sistemas. Obviamente, essas combinações fornecerão diferentes valores de atrito entre as próprias camadas e com as superfícies que estarão em contato. Quando o sistema é formado por várias camadas, a estabilidade será governada pela interface mais fraca que apresentará o menor valor de resistência de atrito. Esse é um detalhe importante que deve ser considerado na concepção de projeto (INGOLD, 1991; VILAR, 2003).

De acordo com VILAR (2003) a importância do assunto ficou caracterizada por vários casos de ruptura de aterros de resíduos reportados a partir da década de 80, justamente quando do início do uso intensivo de geossintéticos em tais obras. A ruptura do aterro de Kettleman Hills (MITCHEL ET AL., 1990; SEED ET AL., 1990) ensejou uma série de estudos acerca da resistência de interfaces.

Os ensaios para a determinação da resistência de interface de uma geomembrana enquadram-se dentro de duas categorias: ensaios de arrancamento e ensaios de cisalhamento direto. Esses últimos são mais utilizados e realizados de acordo com a norma ASTM D5321. Normalmente, utiliza-se uma caixa de cisalhamento de (100 x 100) mm. O ensaio é semelhante ao realizado nos solos: coloca-se a geomembrana em contato com um tipo de solo ou geossintético e aplica-se o esforço cisalhante com uma determinada tensão normal. São necessários pelo menos três diferentes valores de tensão normal para a obtenção da envoltória de resistência. O método de ensaio também sugere a utilização de uma caixa de cisalhamento maior com dimensões de (300 x 300) mm. Essa dimensão da caixa é interessante para a obtenção de valores de deformações residuais que não são obtidas na caixa menor. No entanto, KOERNER (1998) afirma que, apesar dessa avaliação ser útil na resistência ao cisalhamento de georredes e de geogrelhas, *é desnecessária para a maioria das situações práticas*.

INGOLD (1991) apresenta cinco equipamentos distintos para o ensaio de cisalhamento: caixa de cisalhamento fixa, caixa de cisalhamento parcialmente fixa, caixa de cisalhamento livre, caixa de cisalhamento com base larga e caixa de cisalhamento com base central (Figura 2.17). Os esquemas diferem quanto à fixação da geomembrana.

Figura 2.17 – Configurações de ensaios de cisalhamento direto (INGOLD, 1991)

Outras análises de resistência ao cisalhamento utilizam ensaios de plano inclinado, ensaios de cisalhamento em anel (*ring shear*) e ensaios de cisalhamento cilíndrico. BOUAZZA ET AL. (2002) apresentam uma síntese desses ensaios com suas vantagens e limitações.

De acordo com VILAR (2003) a diversidade de ensaios e configurações dificultam a interpretação de resultados divulgados na literatura. Nesses, ocorrem variações de grande magnitude, que podem ser função dos diferentes tipos de ensaios utilizados e seu condicionamento, da forma de interpretação dos resultados e da variabilidade dos geossintéticos. Outros fatores possíveis de interferências incluem as condições de drenagem dos solos em contato com as geomembranas e outros geossintéticos, a faixa de

tensões considerada, a possibilidade de umedecimento das interfaces e o fato de que, comumente, a resistência de pico é mobilizada para pequenos deslocamentos com significativas reduções à medida que aumentam os deslocamentos até atingir-se a resistência residual. Aspectos referentes à importância da resistência residual no projeto de barreiras podem ser encontradas em FILZ ET AL. (2001), GILBERT (2001) e THIEL (2001). INGOLD (1991) apresenta diversas considerações a respeito dos fatores que afetam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

A resistência ao cisalhamento devido ao atrito do solo é definida de acordo com os parâmetros de resistência convencionais: c' (intercepto de coesão efetiva) e ϕ' (ângulo de atrito interno do solo). Os parâmetros correspondentes na análise do atrito solo-geomembrana ou solo-geotêxtil são $\alpha c'$ e δ (δ corresponde ao ângulo de atrito interface solo-geossintético e α à razão entre a adesão na interface e o intercepto de coesão do solo, c_a/c). As Tabelas (2.13) a (2.15) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto obtidos em geomembranas com diferentes interfaces.

Tabela 2.13 - Valores de atrito para interfaces com geomembranas (simplificado de KOERNER, 1998)

Ângulo de atrito Solo-Geomembrana						
Geomembrana	Tipo de solo					
	Areia ($\phi = 30^\circ$)		Areia de Ottawa ($\phi = 28^\circ$)		Areia xistosa micácea ($\phi = 28^\circ$)	
HDPE (lisa)	18°	(0,56)	18°	(0,61)	17°	(0,63)
PVC (rugosa)	27°	(0,88)	-	-	25°	(0,96)
PVC (liso)	25°	(0,81)	-	-	21°	(0,79)
CSPE-R	25°	(0,81)	21°	(0,72)	23°	(0,87)
Ângulo de atrito Geomembrana-Geotêxtil						
Geotêxtil	Geomembrana					
	HDPE (lisa)	PVC (rugosa)	PVC (lisa)	CSPE-R		
Não tecido agulhado	8°	23°	21°	15°		
Não tecido aquecido	11°	20°	18°	21°		
Monofilamento tecido	6°	11°	10°	9°		
Tecido	10°	28°	24°	13°		

Valor entre parênteses corresponde ao parâmetro eficiência baseado na relação
 $E = (\tan \delta) / (\tan \phi)$

Tabela 2.14 – Valores típicos de ângulos de atrito Solo/Geomembrana (SHARMA & LEWIS, 1994)

Geomembrana	ϕ de Areias (°)	ϕ de Areias (°) (Recomendados)	ϕ de Argilas (°)	ϕ de Argilas (°) (Recomendados)
	(E)		(E)	
PVC	21 – 33 (0.62 – 0.93)	20 – 30	6 – 39 (0.53 – 1.0)	6 – 15
HDPE	17 – 28 (0.45 – 0.81)	17 – 25	5 – 29 (0.47 – 0.88)	5 – 10
HDPE Texturizado	30 – 45 (0.86 – 1.0)	30 – 40	7 – 35 (0.70 – 1.0)	9 – 15
VLDPE ^a	21 – 28 (0.62 – 0.67)	-	-	-

^a Como o VLDPE é um produto relativamente novo, poucos resultados foram encontrados na literatura. Antecipa-se que a faixa de valores de eficiência do atrito VLDPE/Areias é mais ampla do que os valores apresentados;

(-) significam dados insuficientes

Tabela 2.15 - Aderência para geomembranas (Apud INGOLD, 1991)

Tipo de solo	Geomembranas			
	HDPE		PVC	
	δ' (°)	$\alpha c'$ (kPa)	δ' (°)	$\alpha c'$ (kPa)
Areia de Ottawa	19	0,8	26	0,3
Areia	27	0,7	33	0,6
Areia c/ 5% de argila	14	0,6	19	0,8
Areia c/ 10% de argila	17	0,6	19	0,7
Saprolito	21	0,4	28	0,5
Argila costeira	25	1,0	23	1,6
Depósito glacial	22	0,7	25	1,0

2.5.12. Análises da Matéria-Prima dos Geossintéticos

Métodos empregados para a caracterização de polímeros podem ser utilizados para monitorar a matéria-prima das geomembranas. Essas técnicas possuem a vantagem de avaliar as propriedades volumétricas e detectarem o início da degradação sendo suficientemente sensíveis a ponto de permitir elucidação precisa do mecanismo degradante. A Tabela (2.16) apresenta as vantagens e desvantagens das principais técnicas comumente utilizadas.

Tabela 2.16 – Técnicas de Monitoramento das Matérias-Primas dos Geossintéticos (HALSE ET AL., 1991)

Método	Informação Obtida	Vantagens^a	Desvantagens
TGA	Tipo de polímero; aditivos; Teor de cinzas; Porcentagem de negro de fumo; Temperaturas de decomposição; Perda de água/umidade	Medida precisa; Alta precisão; Usada para todos os polímeros	Resultados qualitativos; Alto custo
DSC	Ponto de fusão (T _m); Cristalinidade; Tempo de oxidação; Transição vítrea (T _g)	Medida precisa; Alta precisão; Usada para todos os polímeros	Resultados qualitativos; Limitado para polímeros clorados; Alto custo
TMA	Coefficiente de expansão térmica linear; Ponto de amolecimento; Transição vítrea (T _g)	Medida precisa; Alta precisão; Usada para todos os polímeros	Alto custo
IR	Identifica aditivos, cargas e plastificantes; Taxa de reação oxidativa	Usada para todos os polímeros	Preparação da amostra; Sem informação da resina; Alto custo
GC e HPLC	Identifica aditivos e plastificantes	Medida precisa	Preparação da amostra; Sem informação da resina; Alto custo
ρ	Densidade e Cristalinidade	Medida precisa; Valores precisos; Baixo custo	Somente polímeros selecionados; Sem informação da resina;
MFI	Taxa de fluxo	Refere-se ao peso molecular; Medida precisa; Baixo custo	Limitado para polímeros clorados; Valores empíricos
GPC	Distribuição de Peso Molecular; Massa Molar Média	Valores precisos; Técnica válida somente para peso molecular; Usada para todos os polímeros	Não é de utilização comum; Preparação da amostra; Custo muito elevado

^aUma vantagem comum a todos os métodos é o tamanho extremamente reduzido das amostras para os ensaios em comparação aos tamanhos típicos dos ensaios de propriedades físicas e mecânicas.

As técnicas comumente empregadas são a calorimetria de varredura diferencial (DSC), determinação do tempo de oxidação (OIT), a análise termogravimétrica (TGA), espectroscopia infravermelho (IR), análise termomecânica (TMA), densidade (ρ), índice de fluidez (MFI), cromatografia (HPLC) e cromatografia com permeação de gel (GPC). Essas técnicas são usadas para medidas térmicas, composicionais e de propriedades estruturais (TISINGER ET AL., 1991).

Apresenta-se a seguir, um breve resumo das principais técnicas mencionadas.

- Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A DSC é um método termal utilizado para caracterizar o comportamento térmico de polímeros. O aparelho utilizado permite a contínua comparação da diferença de energia entre uma amostra de ensaio e uma referência inerte durante o aquecimento. A amostra é colocada numa panela de alumínio fechada. A energia diferencial para manter a temperatura constante entre a amostra e a referência é monitorada. Transições endotérmicas (como fusão) e exotérmicas (como cristalização) aparecem como picos em direções opostas. A temperatura de transição vítrea é verificada por um “degrau” na curva térmica.

As informações obtidas pela DSC são o ponto de fusão (T_m), cristalinidade (através de calor de fusão), taxa de cristalização, estabilidade de oxidação, temperatura de transição vítrea (T_g) e vaporização (HALSE ET AL., 1991).

O procedimento operacional de uma DSC é extremamente simples. Utilizando-se uma pequena amostra com massa de 2 a 10 mg, satura-se o conjunto (panela + amostra) com gás nitrogênio a uma taxa de 50 cm³/min. Para geomembranas de PE, a amostra é

aquecida a uma taxa de 20°C/min variando da temperatura ambiente até 200°C para observar-se a fusão. Resinas de HDPE apresentam um ponto de fusão em torno de 128° C como ilustra a Figura (2.18). Os resultados obtidos nesse material estão apresentados na Tabela (2.17).

Figura 2.18 – Resultados de ensaio DSC para geomembranas de HDPE (MAIA, 2001)

Tabela 2.17 - Resultados obtidos no ensaio de DSC em amostras virgens de HDPE (MAIA, 2001)

Parâmetros medidos	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (ΔH) (J/g)	% de cristalinidade
HDPE 1,0 mm	130,33	125,7	44,1
HDPE 1,5 mm	135,30	144,4	50,7

O calor de fusão (ΔH) é igual à área sob o pico de fusão e é proporcional à quantidade de cristalinidade no polímero. A porcentagem de cristalinidade é obtida comparando-se o valor de ΔH da amostra com o valor teórico de ΔH para 100% de cristalinização que para o HDPE é de 285 J/g. Na Figura (2.18), o calor de fusão da geomembrana de HDPE (1,5 mm) foi de 144,4 J/g que corresponde a 50,7% da porcentagem cristalina do polímero.

A avaliação da temperatura de transição vítrea (T_g) do PE requer uma câmara fria, uma vez que a T_g deste está abaixo de zero (-36°C). A amostra é colocada a uma temperatura inferior à do nitrogênio líquido (-178°C) e então aquecida. O valor de T_g é indicado quando a curva apresenta uma mudança brusca. Para o PEAD, a T_g não é muito pronunciada devido à quantidade limite de material da fase amorfa. Para a avaliação da T_g , a amostra de HDPE deve ser aquecida acima do ponto de fusão e então levada a -178°C .

Para outras geomembranas poliméricas, como a CSPE, CPE e PVC, seus comportamentos de fusão são mais difíceis de se detectar usando DSC. Esses polímeros são muito sensíveis à degradação termal. Possuem baixa cristalinidade quando comparados ao PE. A Figura (2.19) apresenta a curva de DSC de uma geomembrana de PVC. Ocorre um pico exotérmico a 264°C devido à degradação dos estabilizantes. Esse valor aumenta quando a quantidade de estabilizantes é aumentada (TURI, 1981). O maior pico endotérmico ocorre a 323°C devido à desidrocloração, que é o início de sua degradação térmica.

Figura 2.19 – Termograma DSC de uma geomembrana de PVC (HALSE ET AL., 1991)

Através da Figura (2.20), verifica-se que resinas de VLDPE apresentam um duplo pico de fusão às temperaturas de 103°C e 108°C. Esse duplo pico de fusão pode ser explicado por dois fatores: a natureza química do polímero ou a recristalização do polímero durante a análise térmica. O segundo pico de fusão, consiste na fusão de cristais formados pela recristalização após a fusão inicial. O processo de recristalização gera um pico exotérmico que é fortemente dependente da taxa de aquecimento. A uma baixa taxa de aquecimento, ocorrem graus maiores de recristalização, resultando num pico mais pronunciado (TURI, 1981).

Figura 2.20 – Termograma DSC de uma geomembrana de VLDPE (HALSE ET AL., 1991)

- Tempo de Oxidação (Ensaio de OIT)

A estabilidade de oxidação do PE pode ser obtida pela medida do tempo de oxidação (OIT) que consiste no tempo necessário para que uma amostra de geomembrana seja oxidada sob pressão e temperatura específicas. Como os antioxidantes protegem as geomembranas da oxidação, os valores de OIT indicam a quantidade

de antioxidante (não o tipo) restante na amostra de ensaio (HSUAN & KOERNER, 1998).

De acordo com HOWARD (1973), o valor de OIT é proporcional à concentração de antioxidante presentes em seu respectivo pacote. Para diferentes pacotes de antioxidantes, deve-se ter certa precaução nas comparações diretas entre os valores de OIT obtidos.

Existem dois tipos de ensaios para a verificação do valor do tempo de oxidação: ensaio convencional (Std-OIT) realizado com pressão de 35 kPa e ensaio com pressão elevada de 3500 kPa (HP-OIT). O ensaio convencional e de alta pressão são realizados de acordo com as normas ASTM D3895 e D5885, respectivamente.

No ensaio convencional deve-se, inicialmente, equilibrar as amostras numa temperatura inicial (geralmente temperatura ambiente ou 30°C) no equipamento. Em seguida, realiza-se uma rampa de aquecimento a uma taxa de 10°C/min até a temperatura de 200°C utilizado-se nitrogênio (N₂). Ao atingir 200°C, realiza-se uma isoterma à mesma temperatura por aproximadamente 5 minutos. Em seguida, deve-se efetuar a mudança de gás passando a injetar oxigênio na amostra a uma taxa de 50 ml/min por um período de 100 minutos a 200°C.

No ensaio com pressão elevada, a rampa de aquecimento inicia-se na temperatura ambiente a uma taxa de 20°C/min e atinge a temperatura de 150°C sob atmosfera de nitrogênio. Nesse estágio inicial a pressão na célula de ensaio é de 35 kPa e a temperatura de 150°C deverá ser mantida por 5 minutos. Em seguida, troca-se o nitrogênio pelo oxigênio aplicando-se uma pressão de 3500 kPa. O ensaio é finalizado quando um pico exotérmico ocorre na curva de ensaio. A temperatura de 150°C é especificada porque o HDPE atinge seu ponto de fusão a 140°C. A oxidação térmica da amostra deve ser realizada num estágio de fluidez para eliminar efeitos residuais do

processo de fabricação. Pressões acima de 3500 kPa não alteram significativamente os valores de OIT (TIKUISIS ET AL., 1993). O ensaio a alta pressão é utilizado principalmente na avaliação de antioxidantes do tipo Hals (Aminas estericamente impedidas). Esse tipo de antioxidante desempenha sua função somente até temperaturas de 150°C e, portanto, o ensaio padrão realizado a 200°C pode fornecer valores de OIT extremamente baixos quando o material possuir esse tipo de antioxidante (HSUAN & GUAN, 1997).

Em ambos os ensaios, o valor do Tempo de Oxidação das amostras (OIT) é obtido graficamente verificando-se o tempo decorrido desde o início da aplicação do oxigênio até a oxidação completa do material. Essa fase final é retratada graficamente pelo aparecimento de um pico de oxidação. A Figura (2.21) ilustra um termograma de HDPE que foi aquecido a 200°C por nitrogênio e mantido nessa temperatura por fluxo de ar antes da oxidação ocorrer. O valor do OIT para essa amostra foi de 10,05 min.

Figura 2.21 – Resultado de ensaio OIT para uma geomembrana de HDPE (2,5 mm)

As principais vantagens e desvantagens de cada tipo de ensaio estão apresentadas na Tabela (2.18).

Tabela 2.18 – Vantagens e desvantagens dos ensaios de OIT (HSUAN & KOERNER, 1998)

Tipo de Ensaio	Vantagens	Desvantagens
Std-OIT (200°C, 35 kPa)	• Pequeno tempo de ensaio (< 200 min) • Facilidade de operação • Alta sensibilidade (pode detectar valores extremamente baixos de OIT)	• A alta temperatura de ensaio pode fornecer valor muito baixo de OIT para certos tipos de antioxidantes (e.g. Hals)
HP-OIT (150°C, 3500 kPa)	• Pode detectar diferentes tipos de antioxidantes • Baixa temperatura de ensaio refletindo melhor as condições de campo	• Tempo elevado de ensaio (> 300 min) • Necessita de célula especial de ensaio • Pequena sensibilidade p/ baixos valores de OIT

Deve-se ressaltar que o valor do OIT é sensível ao tipo de antioxidante que está no composto. Portanto, um cuidado especial deve ser tomado ao comparar-se valores de OIT de diferentes geomembranas de PE. Essas geomembranas devem conter o mesmo tipo de antioxidante, caso contrário, o OIT perde seu significado (HALSE ET AL., 1991).

As normas de ensaios da ASTM não especificam quais devem ser os valores mínimos aceitáveis do OIT. Para tanto, pode-se recorrer às recomendações do método de ensaio GM13 do Geosynthetic Research Institute (GRI). De acordo com essa especificação, os valores mínimos aceitáveis do OIT para as geomembranas lisas e texturizadas, independente da espessura, é de 100 minutos para o ensaio padrão a 200°C (Std-OIT) e de 400 minutos para o ensaio realizado com alta pressão a 150°C (HP-OIT). Para a adoção desse critério, os ensaios devem ser realizados de

acordo com as normas ASTM D3895 (Std-OIT) e D5885 (HP-OIT). Após envelhecimento em estufa a 85°C, a percentagem retida para os valores do OIT após 90 dias deve ser de 55% para o ensaio padrão e de 80% para o ensaio realizado sob pressão elevada. Quando houver avaliação da resistência UV, recomenda-se a utilização do ensaio HP-OIT uma vez que a temperatura elevada do ensaio Std-OIT pode produzir resultados incoerentes para alguns antioxidantes presentes nas amostras expostas à radiação UV. Após 1600 horas de ensaio, a percentagem retida para os valores obtidos no ensaio HP-OIT deve ser de 50%.

- Análise Termogravimétrica (TGA)

A TGA é uma técnica que permite a contínua pesagem de uma amostra em função do aumento da temperatura. O ensaio é aquecido a uma taxa constante de temperatura ou pode-se mantê-lo a uma temperatura fixa em atmosfera inerte. Variações na massa da amostra podem ser verificadas pela balança interna do instrumento à medida que ocorre a queima do produto pelo aumento da temperatura. A técnica fornece as seguintes informações:

- a) Determinação das percentagens das resinas, voláteis, aditivos (negro de fumo, plastificantes, etc) e teor de cinzas;
- b) Temperaturas de decomposição de vários componentes na amostra;
- c) Determinação da composição química e sua qualidade na amostra.

Para a análise polimérica de geomembrana, uma amostra de 20 mg é colocada em um recipiente próprio (panelinha) saturando-se o conjunto com gás nitrogênio a uma taxa de 50 cm³/min. O

instrumento é ajustado para fornecer 100% de deflexão para o peso da amostra. Isso permite que o resultado seja lido diretamente na perda percentual de peso. A amostra é aquecida da temperatura ambiente até temperaturas acima de 650° C a uma taxa de 20°C/min para o Polietileno e de 10°C/min para outros polímeros. Mantém-se essa temperatura por pelo menos 10 minutos até que não ocorra perda de massa. Os polímeros, nesse instante, contêm apenas negro de fumo, cargas e/ou resíduo polimérico carbonáceo. Injeta-se ar para oxidar o resíduo para se determinar o teor de cinzas.

A Figura (2.22) apresenta uma curva típica para o HDPE. A curva mostra uma resposta de decomposição simples correspondendo à quebra das principais cadeias poliméricas do polietileno.

Figura 2.22 – Perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de HDPE (1,5 mm)

O início dessa “quebra” ocorre aproximadamente à temperatura de 470°C. O componente em maior proporção é o Polietileno (97,3%). O restante é negro de fumo (2,4%). Oxidando-se a amostra, o teor de cinzas resultantes é de 0,3%.

No entanto, nota-se através da Figura (2.23) que o PVC apresenta dois processos de decomposição ocorrendo às temperaturas de 270°C e 352°C. O primeiro processo inclui a desidrocloração para formar Polienos (saída de HCL) e a degradação de plastificantes. O segundo processo é caracterizado pelas fases de decomposição de polienos. Após essas fases terem sido concluídas, o ar é introduzido para oxidar o negro de fumo e o resíduo de polímero carbonáceo (HALSE ET AL., 1991).

Figura 2.23 – Perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de PVC (1,0 mm)

HALSE ET AL. (1991) afirmam que a quantidade do teor de plastificante no PVC não pode ser deduzida usando-se a TGA devido ao processo de desidrocloração que sobrepõe a degradação do plastificante. A quantidade de plastificante no polímero pode ser determinada usando-se alguma técnica de volatilização. Dissolve-se inicialmente o polímero em cetona e, em seguida, o éter de petróleo é adicionado para precipitar a saída do polímero. Então, por simples pesagem, a quantidade de plastificante pode ser obtida. O tipo e

quantidade de plastificantes também podem ser obtidos usando-se a cromatografia de gás e a espectroscopia infravermelho.

- Espectroscopia Infravermelho (IR)

É a técnica utilizada para a análise qualitativa e quantitativa de polímeros. Pode identificar os grupos funcionais específicos no polímero assim como a concentração destes.

Os grupos funcionais na molécula estão sempre em vibração ou movimento rotacional. Se a frequência de incidência da radiação iguala uma frequência vibracional natural do grupo, uma transferência de energia em rede ocorrerá, resultando numa mudança na amplitude da vibração molecular. Portanto, as faixas de absorção num espectro infravermelho são frequências correspondentes às frequências de vibração do grupo funcional.

Certos grupos funcionais no polímero, como $\text{-CH}_2\text{-}$ e -C=N- , exibem discreto espectro de absorção. Outros grupos como C=O e C-O têm as posições de seus picos de absorção afetados por grupos adjacentes na molécula. Por exemplo, o pico do grupo C-O no metanol é de 1034 cm^{-1} ; no Etanol é de 1053 cm^{-1} . Essas variações resultam do acoplamento da extensão de C-O com C-C adjacente ou vibrações de C-H . Portanto, a espectroscopia IR não somente pode identificar o grupo como também fornecer informações sobre a natureza dos grupos adjacentes na molécula. Geralmente, há vários grupos diferentes funcionais na unidade repetitiva do polímero. O espectro de absorção do polímero é basicamente a soma dos espectros individuais desses grupos. Por exemplo, o espectro do Poliestireno consiste nas faixas de $\text{-CH}_2\text{-}$, benzeno e C-H .

Uma das aplicações dessa técnica em geomembranas é o estudo térmico e fotodegradação de polímeros. A reação oxidativa do polietileno forma um grupo carbonila (C=O) que tem uma faixa de

absorção de 1710 a 1735 cm^{-1} . Os graus de oxidação dos polímeros podem ser obtidos comparando-se a concentração de grupos carbonila em materiais expostos e não-expostos. Pode também ser utilizado para avaliar a estabilização própria no PE. Outra aplicação comum é para identificar os tipos de plastificantes utilizados no polímero (HALSE ET AL., 1991).

2.6. CONTROLE DE QUALIDADE, DE FABRICAÇÃO E ENSAIOS DE CONFORMIDADE

Em aplicações impermeabilizantes tais como contenção de resíduos líquidos/sólidos ou aterros sanitários, qualquer dano provocado à geomembrana poderá causar fluxo excessivo pela mesma comprometendo-lhe a função. Dessa forma, há a necessidade de se garantir a função do produto seja qual for a aplicação específica. Segundo KOERNER (1998) isso é feito através de inspeções verificando-se o Controle de Qualidade (CQ) do produto e a Garantia de Qualidade (GQ) do mesmo. Como as geomembranas são materiais manufaturados e fabricados por diferentes empresas, há a necessidade de se definir as diferenças entre CQ e GQ:

- Controle de Qualidade de Fabricação (CQF): sistema planejado de inspeções usado diretamente para monitorar e controlar a manufatura do material originário da fábrica. O CQF é utilizado pelo órgão manufaturador (ou fabricante) do geossintético e é necessário garantir os valores máximos ou mínimos especificados para o produto.
- Garantia da Qualidade de Fabricação (GQF): inclui inspeções na manufatura e fabricação, verificações, auditorias e avaliações das matérias-primas e dos produtos finais para

verificar a qualidade dos produtos manufaturados. Em termos práticos, verifica se os produtos manufaturados estão de acordo com os documentos de certificação do produto, contrato e especificações.

- Controle da Qualidade de Instalação (CQI): são inspeções usadas diretamente para monitorar e controlar a qualidade de execução do projeto. Normalmente, o CQI é realizado pelo instalador para fornecer alta qualidade no sistema a ser construído. O CQI consiste nas providências tomadas pelo instalador ou contratante para obtenção da conformidade dos requerimentos dos materiais e manufatura com as especificações de projeto.
- Garantia da Qualidade de Instalação (GQI): conjunto de atividades que fornecem a garantia que as obras foram construídas de acordo com o projeto. A GQI inclui inspeções, verificações, auditorias e avaliações dos materiais e manufatura necessários para se determinar e documentar a qualidade da obra construída. Trata-se de um conjunto de medidas tomadas pela organização de GQI para verificar se o instalador ou contratante cumprem as especificações do projeto.

A Garantia de Qualidade de Fabricação e de Instalação (GQF e GQI) são independentes do Controle de Qualidade de Fabricação e de Instalação (CQF e CQI). Embora o CQ e GQ sejam atividades separadas, possuem objetivos comuns e acabam por se complementarem.

Um efetivo programa de GQF/GQI pode identificar deficiências no processo de CQF/CQI, no entanto, um programa isolado de CQF/CQI torna-se insuficiente no gerenciamento de

qualidade aceitável. A qualidade será verificada mais efetivamente através de programas de GQF/GQI e CQF/CQI (KOERNER, 1998).

O controle de recebimento do material é uma característica de suma importância para a qualidade da obra. No entanto, ainda há um hiato entre o que se deve controlar e sua freqüência. O grau de controle da qualidade para receber os materiais dependerá de diversos fatores relacionados à obra (tipo, vida útil, especificações de projeto, etc) e ao próprio produto (danos localizados, especificações, etc). BUENO (2003) ressalta que esse é um tema que, em termos de normalização, vem sendo tratado como *conformidade*. A conformidade pode ser definida como a adequação do material especificado ao realmente entregue na obra. Percebe-se então, que a função do produto e o tipo de obra onde será utilizado passam a ter relevância nesse controle.

Além do controle de qualidade do produto, a conformidade deve abordar aspectos particulares como as propriedades que dão sustentação aos critérios de projeto e ao desempenho da obra. No que se refere à freqüência de ensaios para averiguação da conformidade, tem prevalecido o bom senso dos projetistas (BUENO, 2003). A Tabela (2.19) apresenta um exemplo de avaliação das funções mais importantes dos geossintéticos especificando-se somente as condições mínimas para o controle de recebimento do material. A Tabela (2.20) exemplifica a aplicação em sistema de contenção de resíduos sólidos com as informações necessárias para receber os materiais em obra. Essa situação é mais complexa do que a primeira.

Finalmente, ressalta-se que os materiais geossintéticos devem ser ensaiados para que se obtenha a garantia de qualidade do produto produzido, a garantia de conformidade entre o material especificado e o entregue na obra e a garantia da qualidade do material instalado.

Tabela 2.19 - Exemplo de especificação mínima de ensaios para atender requisitos de conformidade (BUENO, 2003)

Propriedade	Reforço	Drenagem	Filtração	Separação
Resistência à tração	N	N	N	N
Resistência à tração de emendas	C	--	A	--
Resistência ao punção estático	--	C	A	A
Compressibilidade	--	N	N	N
Abertura de filtração	--	A	N	A
Permissividade	--	A	N	--
Transmissividade	--	N	--	--
Fluência:				
Em tração	A	--	--	--
Em compressão	--	A	A	--
Resistência ao cisalhamento de interfaces	A	--	--	C
Resistência química	C	C	C	--
Resistência biológica	--	C	C	--
Resistência ao piping	--	--	A	--
Resistência a danos de instalação	N	N	N	N

Tabela 2.20 - Relação de propriedades e parâmetros para controle de geomembranas em aterros de resíduos (apud BUENO, 2003)

Parâmetros e Propriedades	Identificação do rolo (N)
	Gramatura (A)
	Resistência à tração (N)
	Danos de instalação (N)
	Impacto em juntas (N)
	Perfuração dinâmica (A)
	Resistência à tração de Emendas (A)
	Dobramento em baixas temperaturas (N)
	Estabilidade em altas temperaturas (N)
	Coefficiente de expansão térmica (A)
	Compressibilidade(A)
	Emendas: adesão, cisalhamento, estanqueidade (A)

N: necessários em todas as situações, sempre exigidos no controle de recebimento do material;

A: necessários ao desenvolvimento do projeto, exigidos no controle dependendo das especificações do projeto;

C: resultados exigidos no controle em situações específicas.

2.7. DEGRADAÇÃO DE GEOMEMBRANAS

2.7.1. Considerações Gerais

As aplicações das geomembranas são bastante amplas e freqüentemente são utilizadas nas áreas de transporte (túneis), engenharia ambiental (aterros sanitários, lagoas, reservatórios) e na engenharia geotécnica (barragens, canais, bases de ferrovias). Apesar das vantagens oferecidas pelas geomembranas em relação a materiais de uso consagrado, estas podem degradar quando expostas à radiação UV (intempéries) ou quando em contato com materiais agressivos, lixívias e resíduos industriais. As geomembranas desempenham o papel mais significativo de todos os materiais geossintéticos em sistemas de liners de aterros, pois funcionam como barreiras para os líquidos gerados pela contenção das lixívias (HSUAN & KOERNER, 1995).

Uma barreira impermeabilizante bem projetada e instalada com geomembranas poderá apresentar degradação ou envelhecimento com o tempo conduzindo-a para a ruptura (ROWE & SANGAM, 2002). Diversas investigações têm avaliado o envelhecimento das geomembranas uma vez que o envelhecimento é uma das principais preocupações para materiais empregados em barreiras de contenção. Os ambientes onde os geossintéticos são aplicados são agressivos devido aos efeitos de temperatura, UV, oxidação e agentes químicos que degradam as barreiras (REDDY & BUTUL, 1999).

O envelhecimento não deve ser confundido com a durabilidade. O envelhecimento é o processo que altera as propriedades do material de forma lenta e irreversível sob as tensões do meio. A durabilidade é a capacidade do material ou da estrutura resistir ao envelhecimento de tal maneira que suas propriedades

permaneçam dentro de limites aceitáveis para uma dada aplicação (MAISONNEUVE ET AL., 1998).

O envelhecimento ocorre na geomembrana durante seu período de serviço. O processo de envelhecimento pode ser considerado como uma combinação de envelhecimento físico e químico, ambos agindo simultaneamente (HSUAN & KOERNER, 1995, 1998). O envelhecimento físico está associado com um processo que ocorre quando o polímero tenta estabelecer seu equilíbrio em sua condição manufaturada. Não há quebra de ligações primárias (covalentes). De acordo com PETERMANN ET AL. (1976) quando isso ocorre há um aumento da cristalinidade do material. O envelhecimento químico indica algum tipo de processo degradativo envolvendo quebra de ligações covalentes, ou seja, termo-oxidação, degradação radioativa, etc (STRUICK, 1978). Esse processo conduz à degradação das propriedades de engenharia. Portanto, do ponto de vista de aplicações, o envelhecimento químico é o tipo de degradação que precisa ser compreendido (ROWE & SANGAM, 2002).

Todos os polímeros são susceptíveis à degradação quando expostos à radiação UV, calor, água e oxigênio. A vida útil do material é determinada pela radiação UV (degradação fotoquímica) e oxidação térmica, ou uma combinação desses fatores (VAN ZANTEN, 1986).

Vários fenômenos que causam quebra dos vínculos de uma estrutura polimérica de uma geomembrana devem ser considerados prejudiciais num desempenho em longo prazo (KOERNER, 1990).

HAXO & NELSON (1984) estudaram os fatores na durabilidade de membranas poliméricas utilizadas em barreiras e classificaram os diferentes modos de ruptura de uma membrana, a saber: (a) amolecimento e perda de propriedades físicas devido à despolimerização e cisão molecular, (b) enrijecimento e fragilização devido à perda de plastificantes e aditivos, (c) redução das

propriedades mecânicas e aumento da permeabilidade e (d) ruptura das emendas da membrana. Os efeitos da exposição à intempérie e resíduos estão sumarizados na Tabela (2.21) e os fatores que afetam a durabilidade na Tabela (2.22).

Tabela 2.21 – Efeitos sobre geomembranas expostas à intempérie e resíduos (HAXO & NELSON, 1984)

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

Tabela 2.22 – Fatores que afetam a durabilidade de geomembranas (preparado de HAXO & NELSON, 1984)

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

HAXO & HAXO (1989) descrevem os diferentes parâmetros que influenciam a durabilidade e envelhecimento de produtos geossintéticos em aterros sanitários. Esses parâmetros podem ser agrupados em três grupos: tensões químicas, mecânicas e biológicas. Provavelmente agem simultaneamente e causam diferentes tipos de agressividade ao material. As ações químicas, que são afetadas pela temperatura, são induzidas pela exposição ao resíduo líquido, UV, raios infravermelhos, água da chuva, oxigênio e ozônio. Diferentes efeitos ocorrerão variando desde cisão na estrutura, ligações cruzadas e amolecimento, inchaço e dissolução do polímero, volatilização ou extração de plastificantes e aumento da cristalinidade. As tensões mecânicas são induzidas por penetração, aumento de sobrecarga, carga hidráulica, chuva, granizo, neve e

vento, tensões em superfícies inclinadas e recalques. Seus efeitos na membrana são: rasgo, fissuramento, ruptura e fluência. As tensões biológicas resultam da biodegradação de microorganismos a ataque de roedores, pássaros e insetos que podem afetar certos materiais.

POHL & WESTON (1992) retratam a necessidade de uma análise da durabilidade em longo prazo nas aplicações selecionadas. Para esses autores, os seguintes mecanismos de degradação devem ser avaliados: raios UV, radiação, substâncias químicas, expansão (inchamento), volatilização, deslaminação e oxidação. Reforçam também a análise dos efeitos de variação de temperatura no Brasil que podem aumentar muito durante o dia e/ou variar muito entre o dia e a noite. Com a temperatura muito elevada, a contração da geomembrana pode ser irreversível devido à perda de componentes voláteis. VIDAL ET AL. (1994) ressaltam que a perda de componentes, além de facilitar a degradação e alterar as propriedades de engenharia do produto, pode causar contração e conseqüentemente, esforços de tração suplementares na manta.

KOERNER (1990) afirma que as propriedades a serem monitoradas em muitos tipos de degradação ao longo do tempo são as seguintes: decréscimo no alongamento na etapa de ruptura; aumento/decrécimo da tensão na etapa de ruptura (resistência); aumento no módulo de elasticidade e perda geral de ductibilidade. Deve-se levar em conta também, que as propriedades físicas, mecânicas podem ser avaliadas nos processos de degradação polimérica.

ROWE (1998) ressalta que para a utilização dos resultados dos processos de envelhecimento em análises laboratoriais, é necessário primeiramente, a compreensão deste fenômeno.

Geomembranas de Polietileno (PE) e de Poli (Cloreto de Vinila) (PVC) são os dois tipos mais utilizados em sistemas de contenção de resíduos sólidos e/ou líquidos. Em aterros sanitários,

estas são utilizadas isoladamente, ou adicionalmente, como camadas impermeabilizantes no fundo (base) ou na cobertura. Devido à sua alta resistência química e propriedades de resistência, as geomembranas de PE são os tipos mais comuns usadas para essas funções. Tipicamente, os sistemas de barreiras de base usam geomembranas de HDPE (SHARMA & LEWIS, 1994; KOERNER, 1998).

O PVC é um material polimérico rígido que pode ser transformado em material flexível pela adição de plastificantes. As geomembranas de PVC também são utilizadas em aplicações de contenção de resíduos. Devido às preocupações de durabilidade em aplicações de longo prazo, estas geomembranas têm sido recomendadas nos EUA apenas para aplicações relativamente curtas de um a cinco anos (SHARMA & LEWIS, 1994). No entanto, o instituto internacional de geomembranas de PVC (PGI) tem procurado incentivar o uso do PVC para aplicações de longa duração (e.g. aterros sanitários de resíduos sólidos).

As geomembranas de PVC possuem certas vantagens sobre as de PE uma vez que sua capacidade de expansão é menor que a do PE e sua manufatura pode ser feita em painéis maiores para atender especificações de projeto. Esses painéis facilitam a instalação uma vez que necessitam de poucas emendas em campo. Enquanto as geomembranas de PE são emendadas por aquecimento utilizando equipamento específico, os painéis de PVC podem simplesmente ser emendados por solventes facilitando sua instalação (PEGGS, 1992; SHARMA & LEWIS, 1994).

A seguir, são apresentadas algumas considerações acerca dos principais tipos de degradação que podem ocorrer nas geomembranas.

2.7.2. Principais Tipos de Degradação

2.7.2.1. Degradação Radioativa

O nível de radioatividade acima de 10^6 - 10^7 rads causa degradação polimérica pela cisão de suas macromoléculas. Dessa forma, a utilização de geomembranas pode ser indesejável. Por outro lado, para baixos níveis de radiação, as geomembranas são utilizadas freqüentemente. KOERNER (1998) descreve um número de utilizações do HDPE em contato com material radioativo:

- a) Sistemas de “liners” para aterros
- b) Sistemas de coberturas de aterros
- c) Moinhos de Urânio
- d) Galerias subterrâneas
- e) Container de alta integridade

Esse último utilizado com sucesso desde 1979. Existem poucas referências na literatura a respeito da degradação radioativa de geomembranas.

2.7.2.2. Degradação Biológica

As degradação biológica resulta da ação de micro-organismos vivos em contato ou próximos às geomembranas. Esses organismos podem ser plantas, animais ou protistas. Sua cinética e modo de ação dependem, sobretudo, da atividade dos organismos (nutrição, reprodução, etc). Pode ocorrer a assimilação de alguns componentes da geomembrana pelos agentes biológicos e os produtos

do metabolismo destes podem vir a agir nas geomembranas ou em seus componentes.

Os ataques biológicos podem ser simulados em laboratório através de ensaios acelerados por ataques superficiais ativados pelo aumento da temperatura ou quando a duração da ação diária é aumentada. Um ataque biológico acelerado não é algo fácil de se conseguir. A atividade efetiva do agente biológico deve ser controlada nos materiais utilizados (DEGEIMBRE ET AL., 1991).

Existe um número muito grande de microorganismos vivos no solo. A área de risco biológico para as geomembranas é muito vasta e, portanto, citam-se somente as principais:

- *Resistência aos animais*

Uma preocupação maior para as geomembranas em solos escavados é a escavação de buracos feita por animais. Testes na Alemanha têm o foco de seus estudos sobre os camundongos e grupos de ratos. Tecnicamente, somente algumas substâncias mais duras que os dentes dos roedores ou argilas podem ser eficazes contra o ataque de alguns animais (KOERNER, 1998).

As condições de ensaios são difíceis de se reproduzir ou praticamente impossíveis devido ao fato de que o ataque às geomembranas é feito por uma diversidade de animais. Dentre estes, têm-se os insetos, cupins, ácaros, ratos e roedores em geral. Diferem pelo interesse no suposto “alimento” a ser encontrado na geomembrana, ciclos biológicos, tempo de vida, etc. Se a geomembrana é um obstáculo ao crescimento natural de plantas e/ou outras fontes de alimento dos animais, certamente ocorrerá sua destruição local (DEGEIMBRE ET AL., 1991).

- *Resistência a Raízes*

O método de ensaio suíço SAI 280, por exemplo, descreve um procedimento para ensaios de resistência a raízes. Basicamente, esse método consiste na plantação de uma espécie de planta (geralmente a *Lupinus Albus*) em pequenos containers para verificar-se, após um determinado período, se as raízes ultrapassaram a camada de geomembrana disposta logo abaixo da camada de solo. Geralmente, o período de maturidade da *Lupinus Albus* é de oito semanas. Outros ensaios podem também ser realizados onde as plantas não são tão agressivas, mas o período de maturação geralmente é longo (acima de 4 anos).

- *Resistência Bacteriológica*

As bactérias são organismos entre as mais simples e pequenas formas de vida conhecidas. Raramente excedem 5 µm de comprimento e são usualmente redondas, em forma de varetas e espirais. Seu número é enorme: mais de um bilhão por grama de solo, participando de todas as transformações orgânicas.

A resistência dos plásticos aos ataques de bactérias pode ser determinada por procedimentos descritos na ASTM G22 que consiste nos seguintes passos: (1) seleção de amostras adequadas para a determinação de suas propriedades; (2) inoculação de amostras com organismos adequados; (3) exposição de amostras inoculadas sob condições favoráveis ao crescimento; (4) exame e classificação por crescimento visual e, (5) remoção, esterilização e avaliação das amostras.

Geralmente, os plastificantes, lubrificantes, estabilizantes e corantes é que são responsáveis pelo ataque das bactérias nos materiais plásticos. A temperatura e umidade elevadas favorecem o

ataque microbiológico. Os efeitos esperados são: ataque superficial (descoloração), perda de plastificantes e lubrificantes, variações no peso, dimensões e outras propriedades físicas.

O condicionamento de amostras expostas às lixívias, ao ar livre e ao calor, podem afetar significativamente a resistência dos materiais plásticos ao ataque das bactérias. No entanto, a ASTM G22 não leva em conta a ação desses efeitos. Os ensaios são realizados em incubadores com temperatura e umidade controladas: $36 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa acima de 85%. As amostras podem ter dimensões de (50 X 50) mm. Em cada espécie, a observação dos efeitos é limitada à aparência, densidade de crescimento, reflexão óptica ou transmissão, ou avaliação manual de mudanças nas propriedades físicas como a rigidez. Uma preocupação pertinente é a possibilidade de depósitos de bactérias entupirem e impedirem o fluxo através de geotêxteis, georredes e geocompostos que são freqüentemente utilizados em associação com geomembranas (KOERNER, 1998).

- *Resistência aos Microorganismos*

Esse tipo de avaliação de resistência compreende a resistência aos fungos e a exposição aos solos.

- a) *Resistência aos Fungos*

Inclui-se nos fungos, os fermentos, os cogumelos e o húmus do solo (bolor ou mofo). Podem aparecer em escala muito variada, entre 10 a 20 milhões por grama de solo seco e com constantes trocas populacionais. Geomembranas localizadas próximas a áreas com resíduos em fase de decomposição são, portanto, motivo de preocupação. Entretanto, o elevado peso molecular dos polímeros geralmente utilizados nas geomembranas

mostra-se insensível à degradação. A ASTM G21 trata da resistência dos plásticos aos fungos. Os fungos podem também causar o entupimento de sistemas de drenagens construídos conjuntamente com as geomembranas.

As condições favoráveis para a avaliação dos ataques dos fungos variam de 2 a 38°C (temperatura) e de 60 a 100% (umidade relativa). Os efeitos esperados são semelhantes aos efeitos mencionados na resistência bacteriológica. As amostras podem ter dimensões de (51 X 51) mm.

DEGEIMBRE (1980) submeteu um geotêxtil (PET) ao ataque de fungos segundo o procedimento de ensaio NFX 41.514. Após seis semanas de exposição foram feitas observações visuais. A amostra apresentava-se recoberta por fungos e cogumelos. Após as observações, limpou-se a amostra com uma solução de mercúrio clorado a 1% determinando-se alguns valores de resistência à tração. Após a exposição, a espessura, espectroscopia infravermelho e permeabilidade foram também avaliadas, mas a presença de líquidos residuais e fungos dificultaram a análise dos resultados. Em verdade, a completa remoção dos fungos requer uma enorme quantidade de energia que destrói parcialmente a amostra (DEGEIMBRE, 1980).

b) Exposição a Solos

Um solo artificial é um tipo de húmus com as seguintes características físicas e químicas: $6 < \text{pH} < 7,5$; relação carbono/nitrogênio entre 8 e 15 e teor de umidade de $30 \pm 2\%$.

O meio deve possuir uma atividade tal que a estrutura de um tecido perca sua resistência à tração após um período de exposição de 8 dias a uma temperatura de 30°C e umidade relativa de 95%. Amostras a serem ensaiadas são submetidas ao mesmo tratamento durante 2 ou 4 semanas, ou ainda, por um período de

tempo superior a este. Paralelamente, amostras de geomembranas a serem utilizadas no ensaio são previamente impregnadas com mercúrio clorado e colocadas em um húmus esterilizado (3 dias a 120°C). Essas amostras que são protegidas contra o ataque dos fungos serão submetidas ao envelhecimento térmico e de umidade no solo. Isso ajuda a estabelecer a distinção entre o envelhecimento por ataque de fungos e o envelhecimento por ataque térmico.

2.7.2.3. Degradação Ultravioleta (UV)

A luz solar é, sem dúvida, o fator dominante de degradação em muitos polímeros utilizados nos materiais geossintéticos (SUITS & HSUAN, 2003). A ação de raios UV é o fator mais drástico que afeta materiais à base de PVC quando estes ficam expostos (FAYOUX ET AL., 1993). A quebra dos vínculos da estrutura polimérica pode ocorrer pela penetração de pequenos comprimentos de onda da luz solar. O relativo grau de degradação ultravioleta das geomembranas é menor que o dos geotêxteis. Numa perspectiva de degradação ultravioleta, os polímeros podem conter aditivos que funcionam como um anteparo para minimizar os efeitos da degradação. Geralmente, as especificações que avaliam perspectivas de perigos acidentais esquecem-se da degradação ultravioleta.

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 da 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 ensaios são realizados em campo e em laboratório e necessitam de

um nível considerável de trabalho e pesquisa (REDDY & BUTUL, 1999).

As geomembranas podem sofrer degradação e apresentar fissuras quando expostas por longos períodos aos efeitos da intempérie. De acordo com HSUAN ET AL. (1991) ocorre, nesses casos, o início da degradação por radiação térmica e ultravioleta que irá conduzir à formação de radicais livres e, conseqüentemente, à degradação oxidativa. O fissuramento tem início e a geomembrana torna-se susceptível ao fenômeno do fissuramento sob tensão (stress cracking).

Os polímeros apresentam sensibilidades fotodegradativas diferenciadas à luz UV de diferentes comprimentos de onda (λ). Essas variações de sensibilidade são decorrentes das diferenças em suas estruturas moleculares e composições químicas. A sensibilidade máxima de vários polímeros, determinada pelas energias de dissociação de suas ligações químicas, está dentro da região da radiação UV com comprimentos de onda entre 290 e 400 nm (Tabela 2.23). Segundo a teoria de Einstein, a energia irradiada é quantificada em pacotes concentrados de energia e chamados fótons ou quanta.

Tabela 2.23 - Comprimentos de onda (λ) da radiação UV de máxima sensibilidade para vários polímeros (Adaptado de SUITS & HSUAN, 2003 e de AGNELLI, 2002)

Polímero	λ (nm)	E* (Kcal/mol)
Policarbonato (PC)	295-345	97-83
Polipropileno (PP)	335-360	97-77
Polietileno (HDPE)	330-360	96
Poliestireno (PS)	318	90
Poli Cloreto de Vinila (PVC)	320	89
Poliéster (PET)	325	88

* Energia de um fóton ($E = 28,5 \times 10^5/\lambda$)

A região UV pode ser subdividida em três faixas de comprimentos de onda: UV-A (315-400 nm), UV-B (290-315 nm) e UV-C (abaixo de 290 nm). Algumas referências dividem as faixas UV-A e UV-B em 280 nm. A faixa UV-C não alcança o solo terrestre e a faixa UV-B é a principal responsável pelas mudanças fotoquímicas nos polímeros, contendo em média, somente 0,1% da energia solar total, ou seja, 0,05% no inverno e 0,2% no verão (AGNELLI, 2002).

A Figura (2.24) ilustra os comprimentos de onda obtidos por lâmpadas fluorescentes do tipo UVA-340, UVB-313 e FS-40. Essas lâmpadas são utilizadas para expor materiais à radiação UV.

Figura 2.24 – Comparação de espectros de energia de lâmpadas fluorescentes com a luz solar (ASTM G154)

Os processos fotodegradativos de alguns polímeros (HDPE e PVC, por exemplo) utilizados na manufatura de geossintéticos ocorrem segundo o esquema ilustrado a seguir.

- *Polietileno (PE) e Polipropileno (PP)*

A degradação UV no PE e PP é controlada por uma série de reações envolvendo radicais livres (Equação 2.5).

onde RH é a cadeia polimérica, $h\lambda$ é a energia de um fóton com h representando a constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-27}$ ergs.s), λ representando o comprimento de onda e $R\bullet$, $ROO\bullet$, $RO\bullet$ e $OH\bullet$ são os radicais livres com R representando a cadeia polimérica.

A reação oxidativa conduz a cisão nas cadeias. A energia necessária para gerar radicais livres em poliolefinas é menor do que a necessária para a quebra de suas cadeias. Isso faz com que as poliolefinas sejam mais susceptíveis à degradação UV do que outros tipos de polímeros.

- *Poli (Cloreto de Vinila) (PVC)*

O princípio do mecanismo da degradação UV no PVC envolve o efeito zíper (mecanismo de eliminação monomolecular) que libera ácido clorídrico (HCL) através de um estado de transição cíclico, sendo que o átomo de cloro a ser liberado arrasta o hidrogênio metilênico vizinho, provocando a criação de uma dupla ligação conjugada à primeira contendo polienos (Equação 2.6). A eliminação da primeira molécula de HCL e a conseqüente formação de uma nova dupla ligação cria para o átomo de cloro vizinho uma nova estrutura de cloro alílico. O processo zíper pode prosseguir repetindo esta mesma seqüência. A reação do cloro com o hidrogênio prossegue em cadeia, como zíper ou via radicais livres, conduzindo à formação de longas seqüências de polienos, as quais, a partir de sete duplas ligações conjugadas, já são cromóforos e apresentam coloração que será intensificada com a expansão das zonas poliênicas. A absorção de luz pelos polienos resulta em descoloração e o amarelecimento do polímero puro não é apenas devido ao polienos, mas também ocorre em função do caráter básico dos polienos de alto peso molecular

(SAUNDERS, 1973; VASQUEZ e SAKELLÁRIOS, 1980; GÄUCHTER & MÜLLER, 1993; SUITS & HSUAN, 2003).

onde $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$ é a cadeia polimérica do PVC, $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$ o polieno com dupla ligação conjugada e HCL é o ácido clorídrico.

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.

Para aumentar-se a resistência aos raios UV, alguns aditivos como o negro de fumo e antioxidantes podem ser adicionados às resinas das geomembranas de Polietileno (PE) e PVC (FAYOUX ET AL., 1993; SHARMA & LEWIS, 1994; KOERNER 1998; SUITS & HSUAN, 2003). A radiação UV é absorvida pelo negro de fumo enquanto os antioxidantes atuam no processo de retardamento da degradação oxidativa. As geomembranas de PVC também contêm negro de fumo para retardar o início da degradação UV, contudo, pode ocorrer um progressivo processo de fissuramento devido à volatilização dos plastificantes (SHARMA & LEWIS, 1994). De acordo com KOERNER (1998), as geomembranas de PVC e HDPE possuem negro de fumo ou pigmentos em suas composições na seguinte proporção: 2-3% para o HDPE e 5-10% para o PVC. FAYOUX ET AL. (1993) afirmam que a concentração de negro de fumo é limitada pelo fenômeno de queima que ocorre durante o processo de soldagem. Outra solução, de acordo com estes, é a combinação de pigmentos que inibem o aumento da temperatura e, conseqüentemente, o processo de envelhecimento, deformação, fluência, etc. A estabilização química com Aminas Estericamente Impedidas (HALS)

na qual o radical livre é liberado por cisão, devido à luz, interrompe o processo de degradação. Segundo AGNELLI (2002) as HALS são estabilizantes de luz cuja estrutura é alterada durante a sua exposição à luz UV, formando radicais nitroxil. Estes, rapidamente capturam macroradicais alquila, dando origem a éteres de hidroxilamina. Estes, por sua vez, reagem com os radicais peróxi, interrompendo o processo degradativo e regenerando os radicais nitroxil.

Para a proteção do material em obra, pode-se recorrer a algumas medidas como, por exemplo, a utilização de material mais espesso de maneira que a camada inferior fique protegida por uma camada superior degradada. Outro recurso seria a utilização de membranas ou camada de solo na parte superior (VAN SANTVOORT, 1994). KOERNER ET AL. (1998) sugerem que uma camada de apenas 15 cm acima da geomembrana pode ser suficiente para a proteção contra a ação UV. REDDY & BUTUL (1999) também afirmam que a melhor solução para prevenir os danos da radiação UV é manter uma camada mínima de 15 cm de solo, lixo ou cascalho (pedregulhos) sobre a barreira impermeabilizante de forma que a luz não consiga penetrar no material.

De acordo com KOERNER (1998) a tendência atual para exposição permanente de geomembranas (como coberturas em reservatórios, por exemplo), é utilizar-se garantias manufaturadas. Garantias acima de 20 anos podem ser obtidas em algumas situações para as geomembranas de CSPE-R e HDPE. No caso de geotêxteis descobertos recomenda-se a utilização de negro de fumo e de estabilização química.

Existem alguns ensaios acelerados de exposição utilizados em laboratório para a estimativa de vida útil após exposição aos efeitos da radiação UV (e.g., ASTM G26 e ASTM D4355). Avaliações do desempenho mediante exposições à intempérie podem ser realizadas através de métodos de ensaios como a ASTM

D1435, D3334 ou D5970 (KOERNER, 1998). SUITS & HSUAN (2003) especificam os métodos ASTM D5970 e D4355 e o método de ensaio GM11 do GRI (Geosynthetics Research Institute) para a avaliação da fotodegradação de geossintéticos. O método de ensaio GM11 utiliza lâmpadas fluorescentes com emissão de raios UV e apresenta uma pequena diferença nos ciclos de ensaio quando comparado à metodologia proposta no método ASTM G53 (atual G154).

Como exposto por SUITS & HSUAN (2003) existem poucos dados na literatura sobre correlações entre ensaios acelerados de campo e de laboratório para previsão de vida útil de geossintéticos para quantificação da degradação UV. BAKER (1997) avaliou geotêxteis em exposições de laboratório (lâmpadas de arco-xenônio) e de campo no Sul da Flórida. O autor apresenta uma metodologia para a previsão da degradação à intempérie com base nos resultados dos ensaios de laboratório.

COMER ET AL. (1998) avaliaram o desempenho de geomembranas flexíveis de polipropileno (fPP) em ensaios de campo com geomembranas enterradas e expostas diretamente à luz solar. A degradação UV também foi avaliada em ensaio acelerado em laboratório através de equipamento específico (*fluorescent UV weatherometer*). Concluíram os autores que as geomembranas enterradas apresentaram níveis aceitáveis nas propriedades mecânicas após 6 anos. No entanto, nas amostras expostas, foi observado fissuramento após o período de 26 meses indicando que esse pacote particular de estabilizantes foi inadequado para evitar o processo de degradação UV. O ensaio acelerado em laboratório apresentou boa correlação com os ensaios de campo.

KOERNER ET AL. (1998) avaliaram diferentes geotêxteis (PP e PET) em dois experimentos de laboratório (equipamentos com lâmpadas fluorescentes e de arco xenônio) e em duas localidades (Carolina do Sul e Texas). Os resultados mostraram que os dois equipamentos utilizados em laboratório podem acelerar a degradação

de geotêxteis mais rapidamente que os ensaios de campo. O equipamento que utilizou lâmpadas de arco xenônio apresentou uma taxa de degradação superior a do equipamento com lâmpadas fluorescentes. Concluem ainda os autores que, a degradação obtida nos equipamentos em laboratório, pode ter sido causada pela temperatura elevada de incubação, uma vez que a radiação total das lâmpadas foi significativamente menor que a das exposições em campo.

KOERNER & KOERNER (1995) analisaram o comportamento de geomembranas de HDPE 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 (variações da radiação solar estão entre 0,1 a 4,0 mm). O fenômeno de condução é caracterizado pela transferência do 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 às condições de campo ao longo do ano. Verificou-se que as temperaturas nas geomembranas brancas foram sempre inferiores às demais. Uma pequena diferença foi evidenciada entre as geomembranas lisas e 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 HDPE com espessura de 1,5 mm. 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 irá expandir-se ocasionando as ondas ou rugas. A não formação de ondas e a redução da temperatura podem ser obtidas pela utilização de um geotêxtil ou cascalho como cobertura das geomembranas.

CAZZUFFI ET AL. (1995) apresentam uma análise detalhada das causas da degradação polimérica devido à ação da luz UV e também comparam resultados de exposição em laboratório e campo de sete diferentes geossintéticos. Os ensaios acelerados em laboratório foram realizados em altas temperaturas em períodos de 1.000, 2.000 e 3.000 horas. Os períodos para os ensaios de campo foram de 1.080, 2.060, e acima de 17.280 horas. Materiais como geotêxteis, geogrelhas e geomembranas feitas de PET, PP, PE, PVC e HDPE foram avaliados após exposição UV. Para os geotêxteis foi encontrada uma correlação entre a resistência fornecida pelos ensaios de laboratório e de campo: exposição de 1.000 horas em laboratório foi equivalente a um ano de exposição em campo. Tais correlações mostraram-se realísticas também para geogrelhas e geomembranas. Foi verificado também que um dos principais parâmetros para a resistência UV é a sua espessura: quanto maior a espessura, maior será a resistência. Geotêxteis apresentaram aumento no módulo de elasticidade acima de 370% enquanto as geomembranas e geogrelhas sofreram variações menores, dentro de um nível aceitável. Além disso, segundo os autores, para as geogrelhas e geomembranas, o envelhecimento não é proporcional ao tempo de exposição e as variações ocorrem somente em níveis superficiais.

2.7.2.4. Degradação Térmica

Várias propriedades de geomembranas poliméricas são sensíveis a mudanças na temperatura. Quando as geomembranas são expostas ao calor são submetidas a mudanças em suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. O tempo e severidade de exposição determinarão o grau dessas mudanças. Com o aumento da temperatura, pode haver perda de substâncias voláteis como os

solventes e plastificantes. Uma consequência do aumento da temperatura é o aumento da cristalinidade do material (polímeros cristalizáveis) e, conseqüentemente, aumento de sua densidade. Dessa forma, percebe-se que a temperatura é um parâmetro importante no processo de envelhecimento dos materiais poliméricos devido à sua capacidade de influenciar as taxas de reações, propriedades mecânicas (resistência e alongamento) e de abrasão.

A ASTM D794 trata dos efeitos do calor sobre os plásticos. O método de ensaio D5721 da ASTM procura fornecer uma estimativa da resistência de geomembranas de poliolefinas ao envelhecimento térmico na presença de ar. A ruptura devido ao calor é definida como uma mudança na aparência, peso, dimensões ou outras propriedades que alteram o material para o grau aceitável de serviço em questão. Há um número de procedimentos que podem ser usados para determinar o coeficiente de contração ou expansão de um material. Pode-se citar a ASTM D2102 e D2259 para contração e D1042 e D1204 para expansão e variações dimensionais (REDDY & BUTUL, 1999).

As temperaturas das amostras podem ser maiores do que aquelas que ocorrem nos ambientes circundantes. Isso ocorre devido à espessura do material e por sua opacidade. FAYOUX ET AL. (1993) avaliaram a durabilidade de geomembranas de PVC e constaram que a temperatura causou evaporação dos plastificantes: a 40°C a taxa foi de 0,7 a 3,5 g/m²/ano.

PIERSON ET AL. (1993) avaliaram o comportamento térmico de geomembranas expostas à radiação solar. Os autores verificaram que a temperatura atingiu 80°C na superfície dessas geomembranas. Essa temperatura agindo sobre materiais com alto coeficiente de expansão térmica causa o aparecimento de rugas. Diversas características das rugas em geomembranas são abordadas nessa pesquisa. Os autores propõem uma expressão para o cálculo da temperatura na superfície das geomembranas. Através de diversos

ensaios, os pesquisadores validaram essa expressão. O coeficiente de absorção de calor foi avaliado para diferentes materiais com diferentes colorações. O maior valor obtido foi para o HDPE. Geomembranas brancas utilizadas mostraram-se bastante eficientes na redução da temperatura sobre as geomembranas. Geotêxteis colocados sobre as mantas pretas apenas retardaram o aquecimento não mostrando eficiência na redução do mesmo.

Várias propriedades das geomembranas são dependentes da faixa de temperatura onde são empregadas. Uma temperatura elevada pode conduzir a: (1) decréscimo na 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 soldagem com solventes e substâncias adesivas, (3) trincas em membranas rígidas de PE devido ao elevado coeficiente de expansão térmica (VAN SANTVOORT, 1994).

HSUAN & GUAN (1998) avaliaram cinco geomembranas comerciais de HDPE que foram incubadas em quatro estufas a temperaturas de 115, 95, 75 e 65°C. Após determinados períodos de incubação, amostras foram removidas e ensaiadas para avaliação das propriedades físicas e mecânicas e para avaliação do consumo de antioxidantes usando dois tipos de ensaios de OIT. Os autores concluíram que as propriedades de tração na ruptura mantêm-se inalteradas até que os antioxidantes sejam consumidos. Os ensaios Std-OIT e HP-OIT mediram com eficiência o consumo de antioxidantes (fenóis e fosfitos). Entretanto, o ensaio HP-OIT foi o ensaio mais apropriado para avaliar os pacotes de antioxidantes que continham antioxidantes tiosinérgicos e aminas estericamente impedidas (Hals).

MAIA (2001) avaliou a degradação de geomembranas de PVC e HDPE a uma temperatura de 75°C após 1, 2, 3 e 9 meses de

exposição. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais. Análises térmicas de TGA e DSC também foram efetuadas. Os resultados mostraram que diversas alterações ocorreram nos materiais, mas que não houve uma tendência de comportamento em função do tempo. Para o PVC, a temperatura afetou mais severamente as geomembranas de menor espessura. Para o HDPE ocorreu o processo inverso, ou seja, as maiores variações ocorreram nas maiores espessuras para diversas propriedades analisadas.

2.7.2.5. Degradação Química

A resistência química de uma geomembrana é o aspecto mais crítico do processo de planejamento. Em rejeitos domésticos ou rejeitos de contaminantes perigosos, o poluente afetará diretamente a geomembrana modificando sua resistência (ROWE, 1998).

A penetração de substâncias estranhas na geomembrana pode conduzir à expansão ou dissolução desta. A resistência química de cadeias poliméricas de HDPE é boa quando em contato com álcool, éter e acetona. Como o PE é não-polar, em princípio, deveria resistir menos a substâncias não-polares como o benzeno e o tolueno. No entanto, o alto grau de cristalização do HDPE dificulta a penetração dessas substâncias. O PVC e CPE apresentam resistência moderada a ataques químicos de sais e bases devido às suas longas cadeias lineares. Apresentam baixa resistência a substâncias fracamente polares como a acetona e uma alta resistência a substâncias altamente polares como a água (VAN ZANTEN, 1986).

Conceitualmente, o envelhecimento químico pode ser considerado em três estágios distintos: (a) tempo de consumo de antioxidantes, (b) tempo de indução após o início da degradação e (c) degradação do polímero com decréscimo de alguma(s) propriedade(s) a um nível arbitrário (e.g., 50% do valor original).

Existem dois pontos básicos com relação à ação química: (1) a quantidade de antioxidante e seu consumo ou remoção (difusão ou exsudação) da geomembrana e, (2) a presença de um ambiente onde a oxidação ocorra (HSUAN & KOERNER, 1995).

Segundo KOERNER (1998) os ensaios de resistência química em geomembranas, para condições específicas, necessitam de um número de decisões importantes antes dos testes comecem, a saber: (a) seleção do líquido a ser usado, (b) a maneira correta de incubação da amostra, (c) a maneira correta de ensaiar a amostra e, (d) a avaliação dos resultados. O primeiro item é especificação local. Frequentemente é uma decisão difícil e quando a situação é crítica, decide-se com base no pior caso. Dessa forma, o líquido químico mais agressivo em altas concentrações é usado para a incubação. A incubação das amostras pode ser feita em tanques abertos. Cada vez mais se tem optado por tanques fechados onde se utiliza o método de ensaio 9090 da EPA e o ensaio ASTM D5322 para a avaliação da resistência química da geomembrana. A terceira decisão centra-se no tipo de ensaio a ser utilizado para a avaliação do desempenho da geomembrana após a incubação do líquido. Diferentes escolhas são feitas, mas as seguintes são as mais comuns:

- i) Ensaios de propriedades físicas: avaliam a espessura, massa, comprimento, gramatura e resistência. São os mais fáceis de se realizar;
- ii) Ensaios de propriedades mecânicas: ensaios de tração para avaliar a resistência, alongamento e/ou ruptura em campo, e módulo através do rasgo; punção e impacto são valores usualmente medidos;
- iii) Ensaios de identificação química: os testes mais sensíveis para avaliação são os ensaios para mudanças nas propriedades básicas dos polímeros.

A Tabela (2.24) apresenta um guia geral para compatibilidade química de algumas geomembranas.

Tabela 2.24 - Guia geral da resistência química para algumas geomembranas mais comuns (KOERNER, 1998)

SUBSTÂNCIA QUÍMICA	TIPO DE GEOMEMBRANA							
	Borracha Butílica		PE		PVC		Borracha EPDM	
	38 °C	70°C	38°C	70°C	38°C	70°C	38°C	70°C
Hidrocarbonos alifáticos	-	-	X	X	-	-	-	-
Hidrocarbonos aromáticos	-	-	X	X	-	-	-	-
Solventes clorados	X	X	X	X	-	-	X	-
Solventes oxigenados	X	X	X	X	-	-	X	X
Solventes de petróleo	-	-	X	X	-	-	-	-
Álcoois	X	X	X	X	X	X	X	X
Ácidos orgânicos	X	X	X	X	X	X	X	X
Ácidos inorgânicos	X	X	X	X	X	X	X	X
Bases orgânicas	X	X	X	X	X	X	X	X
Bases inorgânicas	X	X	X	X	X	X	X	X
Metais pesados	X	X	X	X	X	X	X	X
Sais	X	X	X	X	X	X	X	X

OBS: X - Geralmente apresentam boa resistência. Os valores indicados são apenas um referencial básico não servindo para a seleção de produtos para aplicações específicas.

Estas tabelas e resultados de ensaios são muitas vezes chamados incorretamente de tabelas ou ensaios de compatibilidade química. Na química, compatibilidade é situação que ocorre quando duas substâncias peculiares são misturadas (combinadas) uma com a outra, isto é, ocorre exatamente o oposto do que se está considerando nesta análise (KOERNER, 1998).

De acordo com OZSU & ACAR (1992) o primeiro passo num projeto com geomembranas é a verificação de sua compatibilidade química, pois o contato com produtos químicos pode causar alterações na espessura e comprometer a estanqueidade da geomembrana.

LANDRETH (1989) ressalta que, como a exposição química pode alterar a composição do material, suas propriedades mecânicas também irão mudar. Uma ocorrência possível é o

fenômeno do microfissuramento sob tensão (stress cracking) que é causado por uma variação na composição química agindo simultaneamente com tensões mecânicas menores que a tensão de ruptura. Os fenômenos podem agir simultaneamente (sinergismo) e tornarem-se mais agressivos à barreira impermeabilizante. Efeitos sinérgicos aumentam o nível de degradação do material devido às altas temperaturas quando se aplicam tensões mecânicas e durante aplicações prolongadas (KOERNER ET AL., 1992). Quanto mais agentes agressivos atuarem simultaneamente, mais a geomembrana será atacada e, conseqüentemente, menor será sua resistência.

Quando lixívias contêm altos níveis de constituintes orgânicos, pode ocorrer aumento de peso com correspondente redução na resistência e na rigidez do material. Algumas lixívias podem promover a migração de plastificantes e outros aditivos para fora da geomembrana. A perda de plastificantes conduz à perda de peso e flexibilidade. Lixívias com materiais inorgânicos (sulfatos e nitratos) podem causar reações oxidativas nas superfícies das geomembranas. Variações na massa, dimensões e espessura podem não ocorrer nesses casos. Contudo, aumentos na rigidez do produto podem ser verificados uma vez que a oxidação pode provocar reação de ligação cruzada no polímero. A oxidação também pode produzir uma redução na resistência à tração e no alongamento na ruptura (TISINGER ET AL., 1991). A absorção de agentes orgânicos pode causar inchaço ou amolecimento do material. Um detalhe importante é o aumento da cristalinidade que torna o material quebradiço (frágil) diminuindo sua resistência ao fissuramento sob tensão (LAUNDRETH, 1989). O fenômeno de extração também pode ocorrer ao longo do tempo pela perda de certos componentes do produto. Os materiais que são afetados por esse fenômeno são principalmente aqueles que incorporam plastificantes ou cargas. A extração está associada com a fragilização do material (fissuramento superficial) que é caracterizada por um aumento da rigidez e resistência bem

como um decréscimo do alongamento na ruptura (KOERNER ET AL., 1992).

ARTIERES ET AL. (1991) analisaram a durabilidade de diferentes geomembranas expostas a uma lixívia após um período de 16 meses. Todos os materiais ensaiados não apresentaram variações significativas em suas características microestruturais e propriedades mecânicas demonstrando que a lixívia não teve efeito sobre os materiais após o tempo específico de exposição.

LORD ET AL. (1995) apresentam uma interessante revisão sobre os diferentes processos de degradação que diminuem a durabilidade de uma geomembrana. A geomembrana pode dissolver-se no líquido ambiente se seus parâmetros de dissolubilidade coincidem com os parâmetros do líquido. Esse problema é facilmente evitado realizando-se os ensaios em líquidos apropriados. As geomembranas de HDPE não são afetadas por álcool ou detergentes, no entanto, são parcialmente afetadas por hexano, tolueno e carbono tetracloreto causando relaxação de tensões. Ataques severos ocorrem na presença de hidrocarbonos halogenados (alta relaxação de tensões). Esse artigo apresenta uma revisão sobre o estudo realizado pelo grupo *Hoechst* sobre a resistência química de polímeros em contato com diferentes soluções aquosas (oxidantes e não oxidantes).

- *Método de Ensaio 9090 da USEPA (Agência de Proteção Ambiental Americana)*

O método de ensaio 9090 da EPA 9090 (*Ensaio de compatibilidade para resíduos e membranas*) é comumente utilizado para verificar os efeitos de resíduos perigosos e de lixívias sobre barreiras sintéticas. É o método de ensaio mais aceito por agências reguladoras para ensaios de compatibilidade química de

geomembranas. O método de ensaio foi desenvolvido na década de 80 para avaliar a compatibilidade de geomembranas com resíduos líquidos. Combina medidas analíticas e físicas para fornecer uma indicação da magnitude das trocas potenciais degradativas que podem afetar o desempenho global. Procura avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais após períodos de 30, 60, 90 e 120 dias de exposição ao resíduo líquido. Duas temperaturas são utilizadas (23 e 50°C) para observar o comportamento da geomembrana sob condições típicas de obra (23°C) e “condições aceleradas” (50°C). O objetivo da exposição a temperaturas elevadas é de fornecer alguma indicação da capacidade da geomembrana suportar a agressividade do meio ambiente nos aterros para prever o tempo de vida útil deste (WHITE & VERSCHOOR, 1990; TISINGER ET AL., 1991). São utilizados tanques abertos ou fechados para a exposição das geomembranas às lixívias. Compartimentos de vidro ou aço inoxidável polido são utilizados para receber lixívias que contêm concentrações apreciáveis de constituintes orgânicos e, para lixívias inorgânicas, utilizam-se compartimentos sintéticos ou de vidro. Para simulações de campo, que algumas vezes são anaeróbicas, as geomembranas são expostas à lixívia em compartimentos lacrados. Para impedir a estagnação e estratificação do resíduo sobre a geomembrana, este é continuamente circulado através de bombeamento, agitado ou, utiliza-se o processo de vibração mecânica do tanque. A lixívia é recolocada nas câmaras após cada período de exposição para manter-se o nível inicial de componentes durante o ensaio.

Os resultados de ensaios requerem uma avaliação cuidadosa das variações na massa, espessura e valores dimensionais, uma vez que isto fornece indicação fundamental do mecanismo de degradação. Um aumento na massa, por exemplo, indica que houve uma absorção de componentes da lixívia. O programa de ensaio

requer também a determinação de propriedades de tração, resistência ao puncionamento, densidade, dureza, teor de voláteis, resistência hidrostática e teor de extraíveis. As geomembranas semicristalinas devem ser testadas para avaliação da resistência ao fissuramento sob tensão (SC). Três graus de degradação são possíveis: (a) se nenhuma degradação ocorre, o material mostra-se capaz de resistir às condições de ensaio (temperatura, lixívia, duração, etc), (b) inchaço (expansão) do material poderá ocorrer, mas não será considerado um problema realístico se o ensaio é monitorado com cuidado uma vez que o inchamento da amostra representa um primeiro sinal de degradação e, (c) se as propriedades físicas e/ou mecânicas apresentarem sinais de degradação, o material não é considerado suficientemente resistente às condições de ensaio.

Apesar do método de ensaio não especificar a determinação do módulo de rigidez para geomembranas de PVC, essa determinação tem sido realizada por diversos pesquisadores a fim de se avaliar o comportamento do material após processos de exposição a resíduos líquidos ou sólidos. Essas constatações podem ser encontradas em TISINGER ET AL. (1991), LAUWERS (1993), DIEBEL (2000), NEWMAN ET AL. (2001) e MAIA (2001).

Entretanto, o método de ensaio apresenta algumas deficiências: (1) não há critério efetivo para definir mudanças aceitáveis nas propriedades durante a exposição; (2) mudanças nas propriedades quando determinadas em laboratório, não têm sido correlacionadas com aquelas que ocorrem em serviço e com o desempenho ao longo do tempo de sistemas de liners; (3) a duração do período de exposição é curta quando comparado à duração da geomembrana em campo; (4) o programa de ensaio não reflete a composição variada da lixívia ou do resíduo líquido em serviço; (5) os ensaios monitorados podem não apresentar sensibilidade ao início da degradação durante o curso da exposição, isto é, as propriedades avaliadas não são suficientemente sensíveis para detectar as

variações que causam degradação em nível microestrutural ou superficial e, (6) as amostras não são submetidas a nenhuma tensão durante a exposição (WHITE & VERSCHOOR, 1990; TISINGER ET AL., 1991; SHARMA & LEWIS, 1994).

De acordo com KOERNER (1998) o comitê D35 sobre geossintéticos e produtos correlatos da ASTM passou a estimular o uso dos procedimentos de ensaio das normas ASTM D5322 e D5496. No entanto, verifica-se que os procedimentos desses métodos são essencialmente os mesmos do método 9090 da EPA. Outros métodos de ensaio podem ser utilizados para a avaliação da compatibilidade química de geomembranas com líquidos: ASTM D471 (avalia resistência de borrachas e elastômeros) e ASTM D543 (avalia a resistência de plásticos a reagentes químicos). As propriedades físicas e mecânicas são avaliadas em função do tempo de exposição. De acordo com o método de ensaio D543, quando os ensaios são realizados com uma variedade de soluções aquosas, os efeitos da água isoladamente devem ser avaliados para melhor comparação dos resultados. Da mesma forma, quando os ensaios são realizados a temperaturas elevadas, recomenda-se que os efeitos isolados da temperatura sejam avaliados para verificação dos efeitos próprios dos reagentes químicos. Além do mais, a ASTM D5747 pode ser utilizada conjuntamente com a D5322 ou D5496, ou ainda com as duas. O método de ensaio D5747 especifica procedimentos para geomembranas semicristalinas, amorfas, elastoméricas e reforçadas.

No Brasil, os ensaios de compatibilidade química têm sido realizados de acordo com as normas da ASTM e com o método 9090 da EPA. O método de ensaio L1.030 (CETESB) pode também ser utilizado para a avaliação da compatibilidade de geomembranas com resíduos. Entretanto, o método L1.030 possui algumas deficiências e os procedimentos são semelhantes aos descritos no método de ensaio 9090. As principais deficiências são que os ensaios requeridos após a exposição não contemplam ensaios de resistência ao puncionamento,

fissuramento sob tensão (stress cracking – SP-NCTL), ensaios de OIT, MFI, TGA, DSC, resistência de emendas (cisalhamento e descolamento), teor de extraíveis, ponto de amolecimento e densidade. Outra deficiência é a não distinção entre ensaios para geomembranas reforçadas e não reforçadas.

Apesar de suas limitações, o método de ensaio 9090 é freqüentemente utilizado por vários pesquisadores. HAXO ET AL. (1985) e HAXO (1991) avaliaram a compatibilidade de várias geomembranas (incluindo PE e PVC) a lixívia de resíduos sólidos municipais. Os autores verificaram que as concentrações de orgânicos na lixívia eram muito baixas. Isso ficou evidenciado por mudanças pouco significativas nas propriedades físicas em ensaios de laboratório e ensaios em campo. HAXO (1991) questiona a aplicabilidade do ensaio para ensaios de compatibilidade química com lixívias de resíduos sólidos urbanos devido ao alto grau de oxidação, instabilidade e natureza variável da lixívia.

DUDZIK & TISINGER (1990) avaliaram geomembranas de PE expostas à lixívia de um aterro sanitário de resíduos perigosos. Os ensaios foram realizados em laboratório (método 9090 EPA) e em campo através de tanques de exposição. Ensaio de propriedades físicas, mecânicas e análises térmicas (DSC, TGA e IR) foram realizadas após 30, 60, 90, 120 e 365 dias em laboratório e após 120 e 365 dias em campo. As amostras ensaiadas foram geomembranas de HDPE (2,0 e 2,5 mm) e de LMDPE (2,5 mm). Os resultados de IR e OIT mostraram que nenhuma degradação ocorreu nas três geomembranas por oxidação ou por absorção de algum constituinte da lixívia. As variações que ocorreram nas propriedades físicas/mecânicas/microestruturais ocorreram devido à variabilidade da fabricação.

WHYATT & FARNSWORTH (1990) verificaram uma geomembrana de HDPE (1,5 mm) através do ensaio 9090 para verificar sua compatibilidade química com uma lixívia altamente

básica ($\text{pH} > 14$) em solução inorgânica a 90°C . Efeitos de radiação (doses acima de 38,9 Mrad) também foram avaliados. Os resultados mostraram que a geomembrana resistiu satisfatoriamente aos efeitos da radiação e do ataque químico da lixívia.

OVERMANN ET AL. (1993) estudaram a resistência química de geomembranas de HDPE e CSPE-R (com avaliação de emendas devido à sua baixa resistência química). Os ensaios foram baseados no ensaio 9090 com tempos e temperaturas acima do especificado. As temperaturas utilizadas foram de 25, 45 e 70°C e o tempo de exposição variou de 1 a 24 meses. A lixívia possuía $\text{pH} = 8,8$ e foi extraída de aterros sanitários. As variações encontradas nas propriedades após a exposição foram pequenas em comparação às propriedades das amostras intactas. A espessura das amostras influenciou na resistência química evidenciando que quanto mais espessa a amostra, maior sua resistência química. As amostras de CSPE-R tiveram um desempenho insatisfatório apresentando significativo aumento de voláteis, espessura e massa bem como da resistência à tração e de cisalhamento.

SURMANN ET AL. (1995) avaliaram o envelhecimento de geomembranas de HDPE além de verificar efeitos de irradiação sobre as mesmas. Os resultados de imersão na lixívia após 2 anos não apresentaram variações entre as amostras virgens e expostas. Os efeitos da irradiação de raios γ resultaram em quebra e ramificações das cadeias, em perda das características termoplásticas e variações na estrutura atômica.

MAISONNEUVE ET AL. (1998) verificaram o envelhecimento de duas geomembranas expostas a uma solução aquosa de agentes químicos denominada SIM (Synthetic Immersion Medium). Amostras de HDPE (2,0 mm) e de Polipropileno flexível (fPP) foram imersas no SIM a 23 e 60°C com deformação uniaxial induzida de 5% (HDPE) e de 10% (fPP). O período de análise foi de 8 meses

com análises periódicas a cada 2 meses. Os autores concluíram que as análises físico-químicas não evidenciaram fenômeno de envelhecimento nas amostras de HDPE e fPP. Houve apenas uma perda de antioxidantes. As amostras absorveram pequenas quantidades de solventes e apresentaram uma boa resistência às tensões aplicadas.

DUQUENNOI ET AL. (1995) estudaram uma quantidade variada de liners para verificar suas características de envelhecimento. A imersão foi realizada em duas lixívia distintas e em água destilada. Os tempos de imersão foram de 50 meses a 20°C e 27 meses a 50°C. Realizaram-se ensaios uniaxiais e biaxiais para determinação do efeito macroscópico da lixívia. Espectroscopia infravermelho também foi utilizada para análises microestruturais. As geomembranas de PVC com plastificantes do tipo DOP apresentaram amolecimento em ambas as direções. Isso pode ter ocorrido devido ao efeito lubrificante da absorção de água pelo material. Não foi possível determinar os efeitos dos plastificantes sobre as propriedades mecânicas. Geomembranas de PVC com plastificantes EVA apresentaram oxidação menor do que com plastificantes do tipo DOP. As amostras de HDPE não exibiram variações em suas propriedades químicas e de tração. Entretanto, a 50°C uma pequena quantidade de antioxidantes do tipo éster foi provavelmente perdida indicando possível envelhecimento acelerado com a temperatura elevada. Para as geomembranas de PP não foram observadas variações em suas propriedades químicas e de tração. Soluções diluídas de ácido, bases e sais não degradaram as geomembranas de PVC. Para os autores, há a necessidade de se utilizar plastificantes específicos para a prevenção de efeitos de hidrocarbonos. Ressaltam ainda que como uma geomembrana mais espessa incorpora mais plastificantes, a degradação nestas demorará a ocorrer ao longo do tempo.

TISINGER ET AL. (1991) apresentam os resultados de ensaios de compatibilidade química de várias geomembranas em contato com diferentes tipos de líquidos, a saber: solventes, soluções aquosas e poluentes. Esses autores discutem os métodos de ensaios de compatibilidade química, como os métodos de ensaios para composições poliméricas: ASTM; National Sanitation Foundation Methods for Geomembranes (NSFM) e o método 9090 para geomembranas da U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Os autores apresentam os resultados de projetos realizados pela EPA para verificação da compatibilidade química de determinados liners, inclusive geomembranas, quando expostos a resíduos líquidos ao longo do tempo. O projeto inicial expôs 12 diferentes tipos de liners, incluindo seis geomembranas, cinco exposições asfálticas e uma composição de solo-cimento à lixívia de MSW gerada nos simuladores do aterro. As amostras de ensaio foram colocadas nas bases dos simuladores e expostas continuamente à lixívia que foi deixada dentro do tanque a 30 cm acima dos liners. Os resultados obtidos para os efeitos de exposição de seis geomembranas, após 12 e 56 meses, mostraram haver significativa absorção de componentes da lixívia durante a exposição tendo o LDPE a menor absorção e o CSPE-P, a maior. Ao fim da exposição, houve um decréscimo no teor de extraíveis das geomembranas indicando uma absorção da lixívia. As propriedades físicas atingiram um valor mínimo ou máximo após 12 meses, o que pode refletir o efeito da máxima concentração da lixívia. Essa análise foi realizada ao fim do primeiro ano de operação quando se recolheu o primeiro conjunto de amostras de liners. Alguns valores de aumento no peso após 31 meses foram elevados devido ao fato de ter-se limpado inadequadamente algumas amostras. Foram imersas também 28 amostras de geomembranas (Borracha butílica, CPE, CSPE-R, EPDM, LDPE, Neoprene, Poliolefinas elasticizadas, Polibutileno, Poliéster elastômero e PVC) em tanques através dos quais, um fluxo constante de lixívia foi bombeado dos simuladores.

Os resultados de ensaios dessas amostras após 8 e 31 meses de imersão, mostraram uma variação de comportamento de um tipo polimérico de geomembrana para outro e variações substanciais nas propriedades (TISINGER ET AL., 1991). Num segundo estudo, vários ensaios de exposição foram realizados num período superior a sete anos. Os materiais foram expostos a aproximadamente 10 diferentes tipos de resíduos líquidos perigosos com composições variadas: 2 resíduos ácidos, dois resíduos alcalinos, três resíduos de óleo, uma solução de gasolina contendo chumbo, um pesticida e um resíduo industrial salobro. Foram ensaiadas 32 geomembranas, sendo que 8 destas foram instaladas no fundo de tanques onde funcionaram como liners com o resíduo sobre suas superfícies. Os resultados foram obtidos para períodos de aproximadamente 500 e 1250 dias. A geomembrana de borracha butílica apresentou modesta absorção de resíduos líquidos. A geomembrana de PVC apresentou os maiores valores de retenção de resíduos ácidos. As mudanças na rigidez ocorreram por amolecimento causado pela absorção de componentes dos resíduos líquidos ou pelo enrijecimento causado pela solubilização dos constituintes da geomembrana. Em muitos casos, o equilíbrio foi alcançado ao fim de um período de longa exposição. As respostas variaram largamente de geomembrana para geomembrana assim como de resíduo para resíduo. As máximas variações no peso ocorreram pela dissolução essencial da geomembrana. Em muitos dos resíduos, as variações nas propriedades das geomembranas de PE foram insignificantes. Globalmente, os resíduos de óleo tiveram grande efeito sobre as geomembranas. As variações na resistência à tração com 100% de alongamento foram decorrentes das mudanças ocorridas no peso. As duas geomembranas de PVC apresentaram diferenças substanciais, particularmente para as amostras expostas em soluções ácidas e alcalinas. Essas diferenças, provavelmente, devem-se às quantidades de plastificantes perdidos durante o período de exposição. Os autores concluem que esses resultados mostram a

necessidade de ensaios específicos de compatibilidade com diferentes líquidos residuais. Além disso, a duração dos programas de ensaios de compatibilidade é relativamente curta quando comparada com o tempo de serviço das geomembranas. Sugerem também a utilização de análises térmicas (TGA, DSC, IR, etc) para a avaliação de variações microscópicas.

HAXO ET AL. (1988) investigaram vários fatores que afetam a compatibilidade de geomembranas com resíduos líquidos. O objetivo desse estudo foi de desenvolver métodos para prever cada compatibilidade específica. Foram utilizadas 28 composições poliméricas sendo 22 geomembranas comerciais e 6 preparadas em laboratório para essa finalidade de estudo. A análise utilizou 30 orgânicos e água deionizada. Avaliaram-se algumas características como o nível de cristalinidade, variações na mistura, quantidade e tipo de plastificantes. Os resultados mais significativos dessa investigação foram: (a) o grau de cristalinidade do polímero parece ser o primeiro fator dominante na redução da dilatação de uma composição polimérica em contato com os orgânicos e parece não levar em conta as ligações cruzadas e os parâmetros de solubilidade; (b) ligações cruzadas em polímeros amorfos reduzem a dilatação na presença de orgânicos; (c) embora a magnitude de dilatação de polímeros amorfos pode, em muitas ocasiões, ser estimada pela proximidade dos valores dos parâmetros de componentes de solubilidade do polímero e dos orgânicos, a dilatação de uma geomembrana em muitas combinações só poder ser feita com base no tipo de orgânico; (d) ocorreu absorção de orgânicos pela geomembrana na presença de resíduos líquidos contendo orgânicos dissolvidos. As quantidades absorvidas dependem da relação dos parâmetros de solubilidade do orgânico e da geomembrana e da solubilidade do orgânico em água.

BELLEN ET AL. (1987) avaliaram seis geomembranas comerciais imersas em 20 soluções químicas com diferentes

concentrações (ácidos e bases, orgânicos polares e não-polares, soluções orgânicas e não-orgânicas). As geomembranas foram imersas a 23° e 50° C nas soluções por períodos de 1, 7, 14, 28 e 56 dias (ensaio a curto prazo) e de 4 em 4 meses até o período final de 2 anos (ensaio a longo prazo). As amostras imersas foram avaliadas por mudanças na aparência, peso, dimensões e propriedades de tração e rasgamento. As geomembranas utilizadas foram: CPE, CSPE, ECO, EPDM, HDPE e PVC. Foram utilizados líquidos como água, ácido hidrolórico, hidróxido de sódio, cloreto de sódio, dicromato de potássio, fenol, furfurol, cetona etil metil, 1,2-dicloroetano e óleo ASTM#2. Quatro destes são orgânicos utilizados em 3 concentrações diferentes e o cloreto de sódio foi usado em duas concentrações para verificar-se o efeito desta. Os autores verificaram as seguintes respostas frente aos ensaios de imersão: (a) variações no peso e nas propriedades físicas; (b) dilatação por mudanças nas dimensões; (c) dilatação e amolecimento com perda de resistência; (c) encolhimento e endurecimento com perda de alongamento; (d) combinação de dilatação e retração dependendo das condições de imersão. A resposta das geomembranas ao aumento da temperatura de imersão indica que temperaturas elevadas (acima de 50°C), podem ser utilizadas para acelerar a resposta de algumas geomembranas.

MORRISON E PARKHILL (1987) estudaram o efeito simulado das condições de serviço de emendas de geomembranas utilizando amostras de emendas de campo e de fábrica que foram preparadas com método específico e imersas em nove soluções. No total foram testadas 36 combinações de geomembranas e métodos de emendas. Algumas geomembranas utilizadas foram: CPE, CSPE, EIA (Ethylene Interpolymer Alloy), EPDM, LLDPE (Linear-Low Density Polyethylene), HDPE, PVC e PVC/CPE. Amostras de geomembranas e emendas foram imersas em diversos líquidos, a saber: solução aquosa de fenol a 10%, ácido hidrolórico, hidróxido de sódio, cetona etil-metil (MEX), uma solução a 5% de furfurol (Aldeído), metileno

clorado (100%) e soluções de sal saturado a 23° e 50°C. Observou-se que mudanças de peso nas amostras de geomembranas variaram consideravelmente conforme o tipo de líquido e geomembrana. As composições poliméricas termoplásticas semicristalinas dissolveram-se no metileno clorado. As geomembranas de PVC apresentaram significativa perda de peso pela imersão no fenol e nas soluções de hidróxido de sódio. Algumas das geomembranas de CPE e de EIA também perderam peso pela imersão no hidróxido de sódio. As geomembranas de PE exibiram menores variações no peso, embora tenham adquirido peso pela imersão no metileno clorado. Após 52 semanas de imersão em diferentes líquidos, as emendas foram submetidas a diversos ensaios: cisalhamento, descolamento e ensaios a cargas constantes (fluência). Os resultados indicaram que alguns dos agentes orgânicos tiveram um efeito severo nas geomembranas e nas emendas. No entanto, as emendas apresentaram-se satisfatórias após as 52 semanas de exposição. Um conjunto de emendas de LLDPE apresentou boa resistência aos vários líquidos, enquanto outro conjunto do mesmo material, com a mesma técnica de soldagem (cunha quente), não obteve o mesmo desempenho. ROLLIN ET AL. (1990) afirmam que os resultados de ensaios de cisalhamento e descolamento que são utilizados para avaliar a resistência das emendas podem não caracterizar as variações moleculares nos polímeros e a quebra dos vínculos em nível microscópico, sendo essencial a análise microscópica para a avaliação da qualidade das emendas. Outra pesquisa sobre rupturas em emendas foi realizada por CALABRIA & PEGGS (1997). A investigação avaliou as rupturas que estavam ocorrendo em emendas de geomembranas de HDPE duplamente texturizada (espessura de 1,5 mm) em um aterro sanitário da Pennsylvania. As suspeitas iniciais eram de que as rupturas ocorriam pela presença de vapores BTEX (benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno) oriundos do aterro. Após uma revisão dos documentos do projeto e dos resultados obtidos de programas de

ensaios em campo e laboratório, os autores concluíram que: a quantidade de BTEX nos gases do aterro estava de acordo com os padrões normais de aterros sanitários estipulados pela USEPA; gases de aterro, especificamente BTEX, não influenciam a aceitação de emendas de geomembranas; a alta proporção de ruptura nas emendas foi causada pela presença de sujeira entre estas, processo inadequado de aquecimento e extrusão das emendas. Uma discussão abrangente sobre processos de fabricação, inspeção e problemas de emendas em geomembranas é abordada por STRUVE (1990), BOVE & SMITH (1990), MORRISON & SWIHART (1990), PEGGS (1990), LORD, JR ET AL. (1990), OVERMANN (1990), KOERNER & LORD JR (1990), HAXO, JR & KAMP (1990), MLYNAREK ET AL. (1998), ROLLIN ET AL. (1998), LÜDERS (1998), BREUL ET AL. (1998) e THOMAS (1998).

FAYOUX ET AL. (1993) verificaram que uma geomembrana de PVC após 10 anos de exposição à lixívia num sistema de contenção de resíduos não apresentou variações em suas propriedades de tração na ruptura. Pequenos aumentos na rigidez foram observados na geomembrana que estava colocada na base do aterro.

ROLLIN ET AL. (1991) exumaram uma geomembrana de HDPE que estava sendo utilizada por sete anos num aterro sanitário. Análises de propriedades mecânicas e de resistência das emendas foram realizadas demonstrando que os efeitos mais severos ocorreram nos materiais localizados na base do aterro do que aqueles que estavam nos taludes e na cobertura. A resistência das emendas diminuiu de 5 a 20% mas não apresentaram ruptura. Análises nas emendas constataram o surgimento de apenas duas pequenas fendas.

LEVIN & HAMMOND (1990) analisaram uma geomembrana de PVC (0,5 mm) aplicada na cobertura de um aterro sanitário após 5 anos de utilização. Através da avaliação das propriedades físicas e de tração, voláteis e extração de água, pôde-se

constatar que a geomembrana manteve sua integridade após esse período de exposição.

MAIA (2001) estudou o envelhecimento de geomembranas de HDPE e PVC através da exposição a substâncias agressivas (óleo diesel e gasolina) e após exposição a resíduos de aterros sanitários. A exposição à gasolina e ao óleo diesel após 8 meses afetou as duas geomembranas, no entanto, a de PVC apresentou maiores variações em suas propriedades. Após 18 meses de exposição em um aterro sanitário, a geomembrana de PVC (1,0 mm) apresentou um aumento de 120% em sua rigidez. No entanto, as propriedades do HDPE mantiveram-se inalteradas. A geomembrana de PVC exumada de um aterro sanitário de resíduos perigosos não apresentou variações nas propriedades de tração após 12 anos de utilização. Entretanto, a geomembrana exumada não pertencia ao mesmo lote da amostra intacta.

TISINGER ET AL. (1991) concluem que, de acordo com os resultados apresentados e com a experiência de campo com geomembranas, fica claro que muitos resíduos de interesse podem afetar significativamente as geomembranas utilizadas como liners. Esses resultados indicam a necessidade da seleção de geomembranas para aplicações específicas para a determinação e garantia da compatibilidade entre a geomembrana e o resíduo durante o projeto e processos seletivos.

- *Crítérios para Quantificação da Compatibilidade Química*

De acordo com KOERNER (1998) não existem ainda critérios ou regras estabelecidas para variações aceitáveis nas propriedades das geomembranas após exposição a resíduos e/ou lixívias. Além do mais, o autor enfatiza que o PE será mais resistente à maioria dos solventes orgânicos e agentes químicos agressivos do

que outra geomembrana polimérica. A Tabela (2.25) apresenta as recomendações sugeridas por KOERNER (1998) e outros autores para variações aceitáveis nas propriedades das geomembranas.

Tabela 2.25 - Sugestão para valores limites de diferentes ensaios em geomembranas incubadas (KOERNER, 1998)

Polímeros Termoplásticos e Termofixos (e.g., PVC, CSPE-R, EPDM-R)							
Variações nas Propriedades				R		NR	
Taxa de permeabilidade	(g/m ² /hr)			<0.9		>0.9	
Peso	(%)			<10		>10	
Volume	(%)			<10		>10	
Resistência à tração	(%)			<20		>20	
Alongamento na ruptura	(%)			<30		>30	
Módulos (100 e 200%)	(%)			<30		>30	
Resistência à dureza (pontos)	(%)			<10		>10	
Polímeros Semi-Cristalinos (HDPE)							
Variações nas Propriedades		O'Toole		Little		Koerner	
		R	NR	R	NR	R	NR
Taxa de permeabilidade	(g/m ² /h)	-	-	<0.9	≥0.9	<0.9	≥0.9
Peso	(%)	<0.5	>1.0	<3	≥3	<2	≥2
Volume	(%)	<0.2	>0.5	<1	≥1	<1	≥1
Resistência à tração no escoamento	(%)	<10	>20	<20	≥20	<20	≥20
Alongamento no Escoamento	(%)	-	-	<20	≥20	<30	≥30
Módulos	(%)	-	-	-	-	<30	≥30
Resistência ao Rasgo	(%)	-	-	-	-	<20	≥20
Resistência ao Puncionamento	(%)	-	-	-	-	<30	≥30

R = Resistente; NR = Não Resistente

Outra recomendação é encontrada na norma européia prEN13491(2002) que sugere os seguintes critérios de avaliação para barreiras de geossintéticos:

- a) Resistência à lixívia: não deve haver sinais visíveis de degradação; variações nas propriedades de tração devem ser >75% em relação às amostras intactas; a perda na massa da amostra não deve exceder 25%.
- b) Resistência química para aplicações em aterros sanitários e armazenamento de resíduos sólidos: não deve haver sinais visíveis de degradação; a resistência

à tração e alongamento na ruptura não deve variar acima de $\pm 25\%$ em relação à amostra intacta.

- *O Fenômeno do Microfissuramento sob Tensão (Stress Cracking)*

Sob certas condições de tensões e na presença de ambientes que contenham sabões, agentes de umedecimento, óleos ou detergentes, os plásticos de etileno podem exibir ruptura mecânica por fissuramento (“cracking”). Define-se o fissuramento sob tensão (*stress cracking* - SC) por uma ruptura interna ou externa em um plástico causada por tensões de tração menores que sua resistência mecânica num curto espaço de tempo (ASTM D1693). O desenvolvimento de tais fissuras é freqüentemente acelerado pelo meio ambiente ao qual o plástico é exposto. As tensões que causam o fissuramento podem estar presentes internamente ou externamente ou ainda ser uma combinação dessas tensões. A aparência de uma rede de pequenas fissuras (microfissuras) é chamada microfibrilamento. A alta cristalinidade que confere ao HDPE excelente resistência química e características de resistência é também responsável pela susceptibilidade ao fissuramento sob tensão. Assim como em muitos materiais, um ganho no desempenho de uma propriedade freqüentemente se defronta com uma perda em outra.

A microestrutura cristalina de uma geomembrana de HDPE é composta por uma série de lamelas com moléculas dobradas e ramificações laterais que oscilam para fora da lamela e, freqüentemente, se enroscam na lamela adjacente (Figura 2.25).

Figura 2.25 – Estrutura lamelar do PEAD (HSUAN, 2000)

Quando uma tensão elevada é aplicada a essa estrutura, essas cadeias mantêm-se unidas na lamela adjacente e quebram a lamela em fragmentos que produzem o escoamento e alongamento característicos de um ensaio de tração uniaxial. Contudo, quando uma baixa tensão é aplicada, as ligações entre as cadeias têm tempo suficiente para lentamente se soltarem. Isso ocorre de tal maneira que a separação das lamelas irá gerar uma ruptura suave em comparação ao escoamento/alongamento previstos na quebra dúctil.

No campo, as fissuras ocorrem tipicamente ao longo da borda de emendas termoligadas (Figuras 2.26a e b), no menor painel, ao longo dos picos de rugas, ou como “estrelas” sobre pedras pontiagudas.

Figura 2.26 – Ruptura por fissuramento sob tensão (a) na borda de uma emenda (HSUAN, 2000); (b) propagação rápida (PEGGS, 1988)

Embora exista uma extensa literatura sobre o fenômeno do fissuramento sob tensão em plásticos, nota-se que as informações acerca das geomembranas de HDPE são muito limitadas. Em meados de 1980, coincidentemente, foram feitas três revisões sobre o estado da arte do fissuramento sob tensão em três países diferentes (EUA, Canadá e Alemanha). Esses trabalhos surgiram quando o material começou a ser utilizado em aplicações ambientais. TELLES ET AL. (1984) patrocinado pela USEPA (Agência de proteção Ambiental Norte-Americana) pesquisou o fenômeno do fissuramento sob tensão correlacionando-o com vários métodos de emendas. FRUCH ET AL. (1986) preparou uma pesquisa para o “*Alberta Environmental Research Trust*” (Canadá). Essa pesquisa avaliou vários métodos de ensaios para geomembranas de PE. Os autores incluíram na pesquisa a descrição da estrutura molecular do HDPE, seus arranjos, os mecanismos de fissuramento e as teorias correlatas. Concluíram que os métodos de ensaio estavam num completo estado de desarranjo e que pesquisas adicionais seriam necessárias. Finalmente, KOCH ET AL. (1988) desenvolveram pesquisas para o grupo *Hoechst* da Alemanha. Essas pesquisas procuraram desenvolver métodos de previsão de vida útil para geomembranas de

HDPE. A extrapolação foi baseada em ensaio acelerado de seu comportamento dúctil-frágil.

Nota-se um número reduzido de artigos técnicos sobre o fissuramento sob tensão de geomembranas de HDPE na literatura (HSUAN, 2000). FISHER (1989) refere-se a rupturas de campo ressaltando a importância da manufatura, instalação e emendas na prevenção do fenômeno. PEGGS (1988, 1989) faz uma revisão de várias rupturas de campo em diferentes localidades analisando as técnicas de remediação destas. Finalmente, uma inspeção feita pela GEOSYNTEC Inc. (1989) resultou em informações que comparam incidentes ocorridos em 17 localidades com geomembranas de HDPE. A conclusão do estudo, bem como a de TELLES ET AL. (1984) e FRUCH ET AL. (1986), foi a constatação da necessidade de um método de ensaio mais apropriado para a avaliação do fissuramento sob tensão em geomembranas do que o utilizado no método de ensaio da ASTM D1693. As recomendações para a prevenção do fenômeno foram centradas em 4 categorias distintas: materiais e costuras, projeto, construção e regulamentações. HSUAN (2000) analisa a questão dos ensaios da ASTM D1693 e D5397. Através da análise de 16 casos de ruptura por SC, a autora sugere a adoção do método D5397 para avaliações mais precisas acerca do fenômeno.

Na avaliação do fenômeno do “*stress cracking*” em geomembranas de HDPE, aplica-se uma tensão constante sobre o corpo de prova em um ambiente agressivo sob temperatura elevada. Os métodos de ensaio da ASTM D1623 e D5397 especificam um reagente de superfície ativa, o *Igepal* CO-630 (90% de solução aquosa).

De acordo com o método de ensaio da ASTM D1693, amostras dobradas de plástico, tendo cada sobre suas superfícies um corte inicial induzido, são expostas à ação do agente de superfície ativa. A proporção do número de amostras que fissuram num dado tempo é observada. As fissuras desenvolvem-se geralmente no corte

feito e propagam-se para a borda externa da amostra aproximadamente em ângulos retos a esta. Dez amostras são imersas no reagente a uma temperatura de 50°C. O critério usual adota um tempo mínimo de 1500 horas para que não ocorra a ruptura do corpo de prova. Nesse caso, pelo menos 50% dos cps devem manter-se intactos, caso contrário, o material será considerado susceptível ao fissuramento. A análise consiste na observação dos tempos de ruptura dos cps e cálculo da porcentagem destes que romperam.

Semelhantemente ao método acima, o método de ensaio ASTM D5397 utiliza 10 estágios de carga sobre um corpo de prova padrão em ambiente agressivo à temperatura de 50°C. Esses estágios devem ser de 20 até 65% da carga de escoamento obtida em ensaio de tração conforme a ASTM D638. Procura-se obter a curva resultante das tensões aplicadas e seus respectivos pontos de ruptura. Após a obtenção da curva, define-se o ponto de transição da curva (“joelho” ou “nariz”). Esse ponto, tomado no eixo do tempo, deve ser igual ou superior a 100 horas, caso contrário, a amostra será considerada susceptível ao tenso fissuramento. A Figura (2.27) ilustra a curva obtida para esse tipo de ensaio.

Figura 2.27 – Curva típica de um ensaio de fissuramento sob tensão conforme a ASTM D5397 (HSUAN, 2000)

O tempo total de ensaio pode ser superior a três semanas o que invalida um controle de qualidade para as geomembranas.

Dessa forma, uma alternativa proposta por pesquisadores e pela norma D5397 é de se utilizar apenas um estágio de tensão (30%). Utilizam-se cinco corpos de prova e o valor mínimo de ruptura deve ser de 200 horas. O ensaio é denominado de SP-NCTL (*Single Point Notched Constant Tensile Load*) e está especificado no apêndice da norma ASTM D5397.

O instituto de pesquisa de pesquisas de geossintéticos (GRI) especifica a norma GM10 (*Specification for the SCR of HDPE Geomembranes*) para a avaliação do fenômeno do tenso fissuramento. Essa norma segue os critérios apresentados pela D5397.

Maiores detalhes sobre o fenômeno do tenso fissuramento podem ser encontrados em PEGGS & CARLSON (1989), HSUAN (1999) e ROWE & SANGAM (2002).

2.7.2.6. Degradação por Oxidação

A degradação oxidativa é o tipo de degradação que mais afeta as geomembranas de HDPE. As cadeias poliméricas reagem com oxigênio modificando sua estrutura molecular e sua morfologia. Em consequência, as propriedades mecânicas, dielétricas ou estéticas podem sofrer alterações além de limites aceitáveis. Embora as reações oxidativas ocorram vagarosamente durante a vida útil da geomembrana, estas podem vir a aumentar sob condições de serviço e atacar os polímeros. Em geral, a oxidação é desencadeada ou acelerada na presença de energia térmica (ROWE & SANGAM, 2002).

O mecanismo básico dos processos envolvidos em oxidação de polímeros é similar àquele proposto para hidrocarbonetos saturados de baixo peso molecular (HENNINGER ET AL., 1986). O mecanismo de iniciação não é ainda muito bem entendido. É provavelmente causado pela ruptura de ligações C-C ou C-H, através

da ação de calor, fricção durante processamento, oxigênio, resíduos metálicos e contaminantes no polímero.

A Figura (2.28) ilustra os processos cíclicos de interação que ocorrem no mecanismo de oxidação.

Figura 2.28 – Ciclos de oxidação no Polietileno (modificado de ROWE & SANGAM, 2002)

O primeiro ciclo (A) consiste nas reações de cadeia alquil/alquilperóxidos. O ciclo (B) envolve a homólise de hidroperoxidos que alimenta a reação em cadeia com novos radicais. Se ocorrer quebra em uma das ligações, a oxidação poderá ser retardada e até mesmo interrompida se todas as ligações são impedidas. O objetivo dos antioxidantes é de quebrar todas essas ligações e, portanto, são introduzidos para interferir nas reações de cadeias e prevenir os processos autocatalíticos. Esses aditivos ou estabilizantes são específicos para cada tipo de resina. Se a oxidação ocorre, a cisão nas cadeias conduz a um decréscimo no peso molecular tornando o material quebradiço e susceptível ao fenômeno do fissuramento sob tensão (TISINGER & GIROUD, 1993).

HSUAN & KOERNER (1995, 1998) apresentam os estágios em que o processo degradativo ocorre. Esses estágios podem ser visualizados na Figura (2.29).

Figura 2.29 – Estágios de degradação oxidativa de geomembranas de PEAD (HSUAN & KOERNER, 1998)

O primeiro estágio (A) corresponde ao esgotamento dos antioxidantes resultantes de suas reações químicas com oxigênio, radicais livres e peróxidos de alquila ou perda física por difusão, extração ou volatilização. O tempo necessário para o esgotamento do antioxidante dependerá de seu tipo e de sua quantidade presente na membrana. Essa quantidade pode ser medida pelos ensaios de OIT discutidos anteriormente.

Numa resina pura de polietileno, a oxidação ocorre extremamente lenta em seu início. Em seguida, ocorre um processo de aceleração e, posteriormente, de desaceleração. Esses estágios estão ilustrados na Figura (2.30a). A porção inicial da curva é chamada de período indutivo onde o polímero reage com oxigênio formando hidroperóxidos. Entretanto, a quantidade de hidroperóxidos nesse estágio é muito pequena e o peróxido então, não consegue decompor-se em outros radicais livres. Dessa forma, o estágio de aceleração não pode ser iniciado. Em polímeros estabilizados com antioxidantes, a aceleração oxidativa é retardada

pelo fato dos antioxidantes criarem um estágio de consumo adicional antes do início do estágio indutivo (Figura 2.30b). Basicamente no estágio (B), os antioxidantes são completamente consumidos e a concentração de hidroperóxidos começa a acumular-se. Ao atingir um ponto crítico, começa a ocorrer a decomposição dos hidroperóxidos aumentando a quantidade de radicais livres. Estes, por sua vez, irão atacar facilmente o polímero (reações aceleradas de cadeias) indicando o fim do período indutivo (HSUAN & KOERNER, 1998; ROWE & SANGAM, 2002).

Figura 2.30 – Estágios de oxidação para o Polietileno (a) puro (b) estabilizado com antioxidantes (HSUAN & KOERNER, 1998)

No estágio (C), os hidroperóxidos começam a decompor radicais alquilas resultando numa oxidação acelerada. No início dessa aceleração, ocorrem ligações cruzadas nos radicais alquilas devido à deficiência de oxigênio. Isso faz com que o peso molecular aumente enquanto as propriedades mecânicas parecem não apresentar alterações. Prosseguindo o processo de oxidação, a reação de oxigênio com o material e com os radicais alquilas resulta em cisão das cadeias causando redução do peso molecular quando as cadeias tornam-se menores. As variações do peso molecular podem

ser verificadas pelo ensaio de MFI (ASTM D1238). Como consequência da degradação no estágio (C), ocorrerá o decréscimo da tensão e deformação na ruptura enquanto a rigidez e a tensão no escoamento aumentarão. Prosseguindo o processo de degradação, a geomembrana se tornará extremamente quebradiça de tal maneira que poderá ocorrer fissuramento excessivo nas regiões solicitadas (ROWE & SANGAM, 2002).

- *Função dos Antioxidantes*

Basicamente, existem dois tipos de antioxidantes: primários e secundários. Antioxidantes primários (tais como fenóis ou aminas secundárias) são aprisionadores de radicais livres que interrompem a reação de propagação da cadeia. Existem dois tipos de atuação para este tipo de antioxidante: o CB-D (*chain-breaking donor*) e o CB-A (*chain-breaking acceptor*). No mecanismo CB-D, o radical peróxido abstrai um hidrogênio do inibidor AH, transformando-o em um radical A que, posteriormente, poderá reagir com outro radical peróxido e terminar a reação (REMÉDIO, 1999).

O mecanismo CB-A envolve um radical alquila que se liga ao inibidor sem abstrair hidrogênio. Os antioxidantes mais conhecidos que atuam por este mecanismo são baseados em hidroquinonas e compostos nitroaromáticos. Os antioxidantes secundários reagem com hidroperóxidos por um mecanismo iônico para formar produtos sem radicais livres. Tioéteres e fosfitos são os mais importantes representantes deste grupo. A reação de um antioxidante à base de fosfito é mostrada a seguir.

onde R = cadeia polimérica; ROOH = hidroperóxido; P = fósforo;
R₁ = aril ou alquil e (•) indica um radical livre.

O consumo de antioxidantes ocorre por processo de volatilização e de extração. A volatilização é um processo ativado termicamente e as variações de temperatura afetam não somente a evaporação dos estabilizantes da superfície do polímero, mas também a difusão do interior para a camada superficial. Na prática, a volatilização não irá afetar significativamente as geomembranas de PEAD devido ao fato destas trabalharem em ambientes com temperaturas abaixo de 60°C (excetuando-se os casos onde ocorra exposição da manta e/ou aplicações de contenção de certos resíduos químicos, industriais ou radioativos). Para os ensaios acelerados de laboratório onde as temperaturas são elevadas (acima de 50°C), haverá, portanto, perda de antioxidantes através do processo de volatilização. O processo de extração de antioxidantes ocorre quando a geomembrana está em contato com líquidos (água ou lixívias). A taxa de extração é função da dissolução dos antioxidantes da superfície e da difusão do interior da estrutura para a superfície. SMITH ET AL. (1992) verificaram que a dissolução pode ser mais rápida que a evaporação. Em sua pesquisa com tubos de PE de média densidade, os autores verificaram que o consumo de antioxidantes foi três vezes mais rápido na água do que no ar.

Uma característica importante a ser considerada durante a escolha de um antioxidante é a sua faixa de atuação em relação às temperaturas. Os pacotes de antioxidantes devem proteger a geomembrana em temperaturas que ocorrem em seu processo de extrusão como em temperaturas menores que irão ocorrer nas

situações de obra em que serão empregadas. A Tabela (2.26) ilustra alguns tipos de antioxidantes.

Tabela 2.26 – Tipos de antioxidantes (HSUAN & KOERNER, 1998)

Categoria	Tipo Químico	Antioxidantes Comerciais
Primário	Fenol (Hindered)	Irganox® 1076, Irganox® 1010, Santowhite crystals
	Aminas impedidas	Vários tipos de Tinuvin®, Chimassorb® 944
	Fosfitos	Irgafos® 168
Secundário	Componentes sulfurados (Tiosinérgicos)	Dilauryl thiodipropionate (DLTDP) Distearyl thiodipropionate (DSTDP)
	Aminas impedidas	Vários tipos de Tinuvin®, Chimassorb® 944

A Figura (2.31) ilustra as faixas de variações dos antioxidantes listados acima.

As estruturas químicas de alguns antioxidantes primários (Irganox) e secundários (Irgafos) estão ilustradas na Figura (2.32).

Figura 2.31 – Faixa de variação de alguns antioxidantes (apud HSUAN & KOERNER, 1998)

Figura 2.32 - Estruturas de antioxidantes (REMÉDIO, 1999)

Os fosfitos são considerados estabilizantes de processamento devido à sua faixa de temperatura (acima de 150°C). Os demais antioxidantes devem ser adicionados à sua formulação para fornecer proteção em baixas temperaturas. Para formulações que contenham fenóis impedidos, há uma larga faixa de temperatura a ser considerada, no entanto, os fenóis são antioxidantes primários e necessitam de antioxidantes secundários (estes podem ser tiosinérgicos ou aminas impedidas).

Para garantir durabilidade em longo prazo, o fabricante deverá utilizar dois ou mais tipos de antioxidantes ou pelo menos um de cada categoria.

2.8. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL

A vida útil das geomembranas é influenciada principalmente pelos efeitos sinérgicos de ações físicas e químicas que agem ao longo do tempo (ROWE, 1998).

Os fenômenos de degradação foram descritos anteriormente de forma separada e individual. No entanto, observa-se que na prática é comum que dois ou mais mecanismos degradantes atuem simultaneamente (Sinergismo). Pode-se citar, por exemplo, o caso de uma geomembrana para contenção de rejeitos onde podem atuar em sua parte superior o efeito de degradação química e, em sua parte inferior, o efeito de degradação por oxidação. Soma-se a isso também, os efeitos de temperatura da decomposição sólida do rejeito que tende a piorar ainda mais a situação. A avaliação desses vários fenômenos é a essência da previsão da vida útil das geomembranas.

As condições de exposição de uma geomembrana influenciam em seu tempo de vida útil, visto que podem estar em contato direto com as lixívias (função primária) ou sofrerem apenas os efeitos da lixívia que migrou através das primeiras camadas de proteção (função secundária).

As estruturas de tempo envolvidas nos mecanismos de degradação individual de temperaturas e tensões relatadas em campo, compostas de efeitos sinérgicos, não fornecem respostas a respeito do comportamento da geomembrana para o processo de tomada de decisões rápidas em um projeto. Dessa maneira, testes acelerados para altas tensões, temperaturas elevadas e/ou líquidos agressivos estão sendo utilizados. Os métodos citados a seguir baseiam-se nesses princípios anteriores sendo de fundamental importância a superposição de temperatura-tempo: ensaio de limite de tensões, método da razão dos processos para tubos (HDPE), método da razão dos processos para geomembranas, aproximação

multiparamétrica (método utilizado pela *Hoechst*), elevação de temperatura e o modelo de Arrhenius exposto a seguir (KOERNER, 1998).

- *O Modelo de Arrhenius*

O curto espaço de tempo em que as geomembranas foram utilizadas em aplicações em contato com lixívias e/ou resíduos perigosos, torna difícil a previsão de seu tempo de serviço. Na Europa, as geomembranas foram desenvolvidas na década de 60 e sua utilização como *liners* teve início a partir de 1980. No Brasil, as primeiras aplicações ocorreram somente na década de 90.

Devido ao longo espaço de tempo que é necessário para se avaliar a degradação de geomembranas em campo, vários métodos de envelhecimento acelerado têm sido estudados para a simulação do processo de degradação ao longo do tempo.

O modelo de Arrhenius é uma técnica utilizada para a previsão da degradação de materiais poliméricos através do princípio da superposição de temperatura-tempo. Utiliza altas temperaturas de incubação e ensaios subseqüentes para a avaliação das propriedades dos materiais em análise, prevendo dessa forma, seu provável comportamento a temperaturas inferiores àsquelas utilizadas nas fases de incubação. Assume-se que o comportamento do material com a temperatura elevada de incubação (indicado pela energia de ativação) seja constante e pode ser extrapolado a temperaturas menores de interesse prático. Em termos simples, pode-se dizer que se considera uma energia de ativação constante para dois casos extremos. Sabe-se que as reações químicas de todos os tipos ocorrem mais rapidamente a elevadas temperaturas. Algumas vezes o incremento na taxa de reação pode ser drástico até mesmo para um

aumento relativamente baixo na temperatura. Com a introdução de idéias envolvendo a teoria cinética de gases, uma teoria torna possível a explicação desse fenômeno. A taxa da reação (R_r) é apresentada:

$$R_r = (X)(Y)(Z) \quad (2.7)$$

onde R_r = taxa de reação; X = frequência de colisão; Y = fator de energia e Z = fator de orientação (probabilístico)

A equação (2.7) é explicitada abaixo:

número de colisões efetivas por unidade de volume por unidade de tempo	=	número total de colisões por unidade de volume p/ unidade de tempo	X
fração de colisões com energia suficiente	X	fração de colisões que têm orientação própria	

A equação acima se aplica a reações químicas na fase gasosa, onde a energia cinética é a maior fonte de energia. O termo (X) é determinado pela pressão, volume, temperatura e concentração do gás. O termo (Y) é determinado por: a) a distribuição de energia das moléculas gasosas (isto é, a distribuição de velocidade) e, b) a energia de ativação (E_{act}) para a reação. O termo (Z) é determinado pela quantidade de partículas que colidem e que são propriamente orientadas para a reação. O termo (Y) é o mais importante na determinação das taxas de reação como uma função de temperatura.

A distribuição de velocidades (energias) em um gás ideal é oriunda da idéia de Maxwell em 1852 e pode ser descrita por uma curva Gaussiana. A fração de partículas é dada pela seguinte relação:

$$Y = e^{-(E_{act}/RT)} \quad (2.8)$$

onde : E_{act} = energia de ativação para uma dada reação particular;
 R = constante dos gases; T = temperatura absoluta (Kelvin)

A equação (2.7) pode então ser reescrita:

$$R_r = (X)(e^{-(E_{act}/RT)})(Z) \quad (2.9)$$

Para reações simples da fase gasosa, as constantes X e Z podem ser estimadas razoavelmente bem. O termo E_{act} permanece constante para determinações experimentais.

Assumindo-se que X e Z são independentes da temperatura e podem ser tomados como um termo constante (A), novamente pode-se reescrever a equação (2.9):

$$R_r = (A)(e^{-(E_{act}/RT)}) \quad (2.10)$$

A equação (2.10) é conhecida com equação de Arrhenius. Pode-se notar que a proporção das taxas de duas temperaturas diferentes (T_1 e T_2) podem ser escritas como se segue. O termo “ A ” das duas taxas de reação é cancelado.

$$\frac{R_{r1}}{R_{r2}} = e^{-(E_{act}/R)[1/T_1 - 1/T_2]} \quad (2.11)$$

Tomando-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação (2.11), tem-se:

$$\ln R_r = \ln A - E_{\text{act}} / RT \quad (2.12)$$

Se o log da taxa de reação é *plotado* contra o inverso da temperatura como mostra a Figura (2.33), a inclinação da reta será $(-E_{\text{act}} / R)$ e o intercepto no eixo vertical será a constante $\ln A$.

Figura 2.33 - Gráfico de Arrhenius generalizado para previsão de temperaturas em condições locais (KOERNER ET AL., 1992)

A Figura (2.33) é chamada de Gráfico de Arrhenius, donde as taxas de reações a baixas temperaturas (condições locais) podem ser previstas por extrapolação de dados experimentais a altas temperaturas. A equação tem sido utilizada para prever degradação em longo prazo de vários materiais poliméricos.

Para a utilização do modelo de Arrhenius, um conjunto de ensaios de laboratório é necessário para a geração dos valores experimentais requeridos para o modelo. A Tabela (2.27) fornece os possíveis métodos de ensaios para a avaliação da degradação polimérica através do modelo de Arrhenius.

Tabela 2.27 - Ensaios possíveis para avaliar a degradação polimérica para uso no Modelo de Arrhenius (KOERNER ET AL., 1992)

Categoria	Método de Ensaio	PP	PE	PET	PVC	CSPE & CPE	PS
Propriedades Mecânicas	Resistência	P	P	P	P	P	P
	Alongamento	P	P	P	P	P	P
	Tensão cte (fluência)	P	P	n/a	n/a	n/a	P
	Deformação cte (relaxamento)	P	P	P	P	P	P
Propriedades Físicas	Densidade	P	P	P	n/a	P	P
	Rigidez	S	S	S	P	n/a	S
	Transição vítrea	n/a	n/a	P	S	n/a	P
	Cristalinidade	P	P	P	n/a	n/a	n/a
	E'/E" (tan δ)	S	S	S	P	P	P
Propriedades Químicas	Peso molecular	P	P	P	P	P	P
	Tempo Indução Oxidativa (OIT)	P	P	n/a	S	S	P
	Absorção de oxigênio	P	P	S	P	P	S
	Índice carbonila	P	P	S	P	P	n/a

P = Método Primário; S = Método Secundário; n/a = Método não aplicável

Comentário : “P” e “S” sugerem que as medidas são possíveis de se obter mas não implica ou assume que os dados necessariamente serão conformados com o Modelo de Arrhenius.

O procedimento experimental para o uso do modelo de Arrhenius é apresentado a seguir (KOERNER ET AL., 1992):

- a) Incubação de um conjunto de amostras em líquidos específicos a uma temperatura elevada (T_1);
- b) Remoção da primeira amostra em tempo especificado e realização de ensaios conforme a Tabela (2.27);
- c) Comparação dos valores obtidos com os valores da amostra intacta, obtendo-se a fração retida da propriedade analisada, ou então, utilizando o próprio valor obtido de ensaio;
- d) Plota-se o par de valores fração retida (ou valor obtido) no eixo das ordenadas *versus* seu tempo correspondente de incubação no eixo das abscissas, que será o primeiro ponto da curva a ser determinada (curva T_1);
- e) Procede-se analogamente com as amostras restantes, retirando-as uma a uma, com seus tempos de incubação sucessivamente maiores e análise de suas propriedades conforme o item “c”;
- f) Através dos pontos gerados, obtém-se a curva para a temperatura especificada de ensaio (temperaturas muito elevadas podem degradar inteiramente o material e resultar em retenção nula de propriedades);
- g) Repete-se inteiramente o processo com um novo conjunto de amostras a uma temperatura (T_2) inferior à inicial (T_1). Espera-se que com $T_2 < T_1$, a quantidade de propriedade retida seja maior para um tempo de incubação equivalente. As curvas tornam-se mais “suaves” à medida que a temperatura de incubação diminui;
- h) Se possível, gerar curvas para temperaturas T_3 e T_4 ;
- i) Obtidas as curvas, adota-se um valor de degradação das propriedades. Costuma-se utilizar o valor de 50% (metade da vida útil, designado por “*half-life*”), no entanto,

KOERNER ET AL. (1992) afirma que esse valor é completamente arbitrário;

- j) Para o valor adotado (*“half-life”* ou outro qualquer), buscase nas curvas obtidas ($T_1, T_2, T_3, \dots T_n$) os respectivos valores de tempo de incubação ($t_1, t_2, t_3, \dots t_n$);
- k) Com os pares de valores ($1/T$; $1/t$), constrói-se o gráfico de Arrhenius com os valores de ($1/T$) em escala natural (no eixo das abscissas) e os valores de ($1/t$) em escala logarítmica (no eixo das ordenadas);
- l) O modelo torna-se inapropriado quando não ocorre um ajuste linear entre os pontos obtidos. Isso pode ser explicado por imprecisões experimentais, por distribuição de energias de ativação ou pela temperatura elevada que pode afetar o polímero;
- m) Finalmente, calcula-se a inclinação da reta obtida que será ($-E_{act} / R$) e utiliza-se o procedimento descrito anteriormente para a estimativa da degradação a temperaturas de serviço menores que as temperaturas de ensaio. O gráfico de Arrhenius permite, através de extrapolação, que se obtenha a temperatura desejada sem a necessidade de maiores cálculos.

Para ilustrar o procedimento descrito anteriormente, tomemos o seguinte exemplo: usando uma câmara como mostra a Figura (2.34), MITCHELL & SPANNER (1985) realizaram ensaios de tensões de compressão, exposição química e oxidante, elevação de temperatura e ensaios ao longo do tempo para geomembranas. O material foi submetido a uma tensão normal de 260 kPa e imerso em um líquido a uma profundidade de 30 cm. A areia inferior estava seca e as geomembranas possuíam espessura de 1,5 mm. Amostras foram

removidas periodicamente e avaliaram-se suas propriedades mecânicas, físicas e químicas através de ensaios específicos.

Figura 2.34 - Desenho esquemático da câmara utilizada por MITCHELL & SPANNER (1985)

A Figura (2.35a) ilustra as curvas obtidas para as temperaturas de incubação de 85, 75, 65 e 50°C. Decidindo-se sobre uma máxima mudança de propriedade (por exemplo, 50% de redução) a cada temperatura, determinou-se o gráfico de Arrhenius que está ilustrado na Figura (2.35b).

Através do gráfico da Figura (2.35b), a temperatura local especificada pôde ser extrapolada. A equação para a extrapolação é dada por:

$$\frac{Rr1}{Rr2} = e^{-(E_{act}/R)[1/T1-1/T2]} \quad (2.13)$$

onde :   r1 = T-ensaio; r2 = T-local; T1 = T-ensaio e T2 = T-local

Figura 2.35 - Modelo de Arrhenius para a previsão da vida útil através da ação de temperaturas elevadas (KOERNER, 1998)

Investigações têm sido conduzidas no sentido de se verificar o tempo de vida útil de geomembranas em aterros sanitários. HAXO JR & HAXO (1988) resumem as opiniões de especialistas da USEPA que afirmam que o tempo de serviço das geomembranas pode ser da ordem de centenas de anos. TISINGER & GIROUD (1993) apóiam essa afirmação ressaltando que as geomembranas utilizadas em aterros podem proteger a água subterrânea por centenas de anos.

Vários trabalhos sobre a vida útil de encanamentos de gás natural têm sido realizados pela *Hoechst*. Seus trabalhos estão sendo estendidos às geomembranas gerando conclusões como a de

que a interação destas com lixívias é o principal fator que altera sua vida útil. Através de alguns fatores de correção apropriados de tensão, torna-se possível aplicar as curvas de “tempo de serviço” de encanamentos a painéis de geomembranas. Com base nesse trabalho, KOCH ET AL. (1988) concluíram que: (1) a aplicação da extrapolação de Arrhenius para a previsão da vida útil de geomembranas de HDPE tem sido confirmada durante 30 anos; (2) baseado na extrapolação de Arrhenius, o tempo para alterações químicas/mecânicas em ambientes aquosos a 25°C está entre 300 e 400 anos, assumindo-se que a lixívia contenha o mesmo teor de oxigênio usado em laboratório; (3) devido ao ambiente anaeróbico, com pouco ou nenhum oxigênio, em um aterro, o tempo para alterações químicas deve ser maior do que os tempos fornecidos pelos resultados de laboratório; (4) considerando-se todos esses fatores, a vida útil de geomembranas de HDPE pode ser considerada acima de 100 anos.

ROWE & SANGAM (2002) discutem diversos trabalhos sobre estimativa de vida útil de geomembranas. HSUAN & KOERNER (1998) avaliaram o consumo de antioxidantes em geomembranas de HDPE e estipularam que a vida útil das geomembranas pode ser estimada em função desse consumo. Para esses autores, o consumo de antioxidantes nas geomembranas de HDPE analisadas ocorre somente após 40 anos (a 25°C) quando imersas em água. Se as geomembranas forem cobertas por uma camada de areia, esse tempo pode chegar a 120 anos. Se a temperatura cai para 20°C, o tempo aumenta para 200 anos. ROWE (1998) avaliou novamente os dados desses autores e estimou que a vida útil de geomembranas de HDPE em aterros sanitários pode chegar a 150 anos (função primária) em temperaturas menores que 25°C. Para geomembranas com função secundária, esse tempo chegaria a 300 anos (temperaturas a 15°C) e a 400 anos (temperaturas a 10°C).

ROWE & SANGAM (2002) ressaltam que em aplicações de base de aterros sanitários, a vida útil real dependerá de propriedades hidráulicas e difusivas das geomembranas e, portanto, a geomembrana poderá perder resistência enquanto ainda apresenta desempenho satisfatório como barreira. Dessa forma, a vida útil com relação às propriedades hidráulicas e difusivas de uma geomembrana pode ultrapassar a vida útil estimada por propriedades mecânicas e físicas especialmente se as tensões de tração forem mínimas.

Deve-se levar em conta que o modelo de Arrhenius apresenta suas limitações. O principal problema é que no instante que se considera uma energia de ativação simples, existe na verdade uma distribuição de energias de ativação. Isso reflete a multiplicidade de reações que podem levar à degradação final do produto. A frequência de colisão no termo (X) no estado sólido envolve também energias cinéticas de rotação e vibração que são mais difíceis de se descrever do que as energias cinéticas de um gás ideal. O fator de orientação (Z) também se torna muito complicado com entropia orientacional da reação. No entanto, KOERNER ET AL. (1992) ressaltam que o modelo de Arrhenius, apesar de suas limitações, vem sendo até o momento, uma ferramenta viável apresentando bons resultados.

2.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de geomembranas tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas em todo o mundo. Isso se deve à maior distribuição de dados e informações sobre as propriedades e a eficácia destas, bem como o desenvolvimento de métodos de controle de qualidade na produção e instalação das

mesmas. Consequentemente, as exigências de um melhor controle de qualidade torna-se necessário, uma vez que houve um aumento de suas aplicações. A análise das condições críticas, feita na fase de projeto, relaciona-se diretamente com a eficácia em campo (POHL & WESTON, 1992).

Ensaio de compatibilidade química serão necessários caso os dados não estejam disponíveis para um produto químico ou condições de contato específicas. Se os dados existem, ensaios de conformidade e de desempenho deverão ser realizados, com o objetivo de verificar se a geomembrana especificada para um projeto específico possui as propriedades requeridas pelas especificações técnicas. TISINGER ET AL. (1991) ressaltam que, como a duração de programas de ensaios de compatibilidade química é relativamente curta, comparada com o tempo de serviço esperado, análises térmicas devem ser incorporadas aos ensaios de exposição de geomembranas. Além disso, as condições de exposição precisam ser reavaliadas para possíveis modificações nos ensaios de durabilidade e nos métodos pelos quais as amostras de geomembranas são expostas às lixívia.

No Brasil, os ensaios de compatibilidade química seguem as recomendações das normas ASTM, ISO e do método 9090 da EPA. Esse último possui diversas deficiências como explicitado anteriormente. Outro questionamento refere-se às temperaturas utilizadas nesse ensaio. Em aterros sanitários, a temperatura de serviço pode ser da ordem de 50°C ou ainda estar acima desta. Dessa forma, a condição acelerada proposta no método seria apenas uma condição de serviço. RAMKE (1989), LECHNER & LAHNER (1991) reportam-se a efeitos de altas temperaturas (50°C a 70°C) em vários aterros da Europa. Segundo ROWE (1998), a temperatura das lixívia pode vir a afetar o desempenho de liners em aterros e possui implicações com respeito à taxa de difusão dos contaminantes através de geomembranas. Ocorre também, o aumento de

temperatura com o aumento da profundidade dentro de um aterro. Analisando dois sistemas na Alemanha, o autor verificou que os picos de temperatura foram atingidos a uma profundidade de 30 m abaixo da superfície. As temperaturas das bases dos aterros após 10 anos variaram de 30° a 60°C, onde o nível de lixívia encontrava-se entre 4 a 6 m acima da base do aterro. Esse perfil de temperatura não ocorre somente na Alemanha. ROWE (1998) analisou um aterro no Japão com 30 m de profundidade que foi preenchido muito rapidamente no período de 1976 a 1979. O pico de temperatura observado em 1985 foi de quase 70°C. Na base do aterro, a temperatura atingiu 50°C. O nível da lixívia estava entre 20 a 25 m acima da base do aterro. Em um aterro de *Brock West* (Canadá), as temperaturas variaram de 20°C em superfície a 60°C numa profundidade de 20 m. As condições eram anaeróbicas e o nível da lixívia era de 22 a 25 m acima da base do aterro.

De acordo com TISINGER ET AL. (1991) todas essas deficiências conduzem a dificuldades na interpretação dos resultados de um ensaio do tipo 9090 da EPA.

No contexto internacional, a análise de compatibilidade química e de envelhecimento acelerado vem sendo estudada há algum tempo procurando-se cada vez mais a reformulação dos conceitos, idéias e padrões de ensaios e tecnologia. O processo de envelhecimento de geomembranas ainda é pouco estudado em nosso país devido à recente incorporação de materiais geossintéticos. Não se contam ainda três décadas de aplicação destes nas obras em geral. VIDAL ET AL. (1994) ressaltam que diversas metodologias de envelhecimento vêm sendo propostas: o envelhecimento natural sem aceleração enterrando-se amostras em solo ou mergulhando-as em soluções, envelhecimento acelerado e o envelhecimento mecânico (ciclos de tração e alívio ou carregamento simples, algumas vezes em temperatura mais elevada para acelerar o envelhecimento). Esses

autores questionam a capacidade dessas metodologias simularem situações e o surgimento de comportamentos não representativos por alterações estruturais.

Com relação aos métodos de previsão de vida útil, deve-se notar que existem muitos trabalhos abordando apenas geomembranas de HDPE. Efetivamente, as previsões feitas só poderão ser validadas após a obra ter atingido sua vida útil. Por enquanto, deve-se tomar os valores abordados na literatura com certa cautela. Ademais, a questão da degradação das geomembranas possui ainda diversos fatores que dificultam suas análises mesmo em curto prazo. O comportamento de suas propriedades ao longo do tempo ainda não possui uma explicação técnica razoável. Geralmente, ocorrem oscilações de aumento e decréscimo das propriedades. Esse comportamento pode ter causas diversas como a própria anisotropia do material. Por outro lado, os efeitos degradativos avaliados em laboratório para os materiais podem estar sendo super estimados e não correspondem às situações de campo. Em muitas situações como em aterros sanitários, a geração de percolado é muito pequena e, em algumas situações, pode nem mesmo atingir a geomembrana.

Pelo fato de a indústria de HDPE possuir maior quantidade de dados referentes ao controle de qualidade (CQ) e de garantia de qualidade de instalação (GQI), existe uma presunção de que a qualidade das geomembranas de HDPE e de suas emendas é melhor do que as de PVC (PEGGS, 1992). Uma (GQI) abrangente é essencial para o HDPE, particularmente em locais muito frios, uma vez que seu desempenho é criticamente dependente de uma aplicação apropriada (bem executada), pois não é um material maleável como o PVC. Recentemente, os fabricantes e aplicadores de geomembranas de PVC, por sua iniciativa própria, têm procurado gerar dados técnicos abrangentes de controle de qualidade (CQ) e de projetos de

garantia de qualidade de instalação (GQI). Esses dados têm sido constantemente divulgados pelo Instituto de Geomembranas de PVC (PGI).

PEGGS (1992) realizou um estudo das características do HDPE e PVC argumentando a existência de uma tendência para o uso de HDPE ignorando-se seus aspectos negativos e esquecendo-se todas as características positivas de outros materiais como o PVC. Com relação à resistência química, o HDPE possui tecnicamente maior resistência que o PVC para lixívia de resíduos municipais. No entanto, o PVC pode oferecer também, resistência suficientemente adequada para serviços dessa ordem. Diversos trabalhos na literatura enfocam um bom desempenho de geomembranas de PVC em utilizações ambientais. PEGGS (1992) apresenta resultados satisfatórios de compatibilidade de geomembranas de PVC com lixívia perigosa e de resíduos municipais avaliadas pelo método de ensaio 9090 da EPA. O mesmo autor relata trabalhos realizados na França, onde uma geomembrana de HDPE e duas de PVC foram expostas a duas lixívias diferentes de resíduos municipais. Após 16 meses a 20°C e 3,5 meses a 50°C, a superfície do PVC foi afetada somente a uma profundidade de 0,08 mm e o HDPE a uma profundidade levemente superior a 0,10 mm. Concluiu-se que os dois materiais puderam conter adequadamente as lixívias. TAYLOR (1991) avaliou uma geomembrana de PVC de um aterro na Pennsylvania (USA), onde esta ficou exposta por 11 anos. Não havia sinais visíveis de degradação e a geomembrana apresentava-se bem flexível. ADAMS (1997) avaliou as propriedades físicas de uma geomembrana de HDPE com 0,75mm de espessura utilizada por três anos numa lagoa para tratamento de águas de esgoto. O autor constatou apenas uma pequena diminuição na porcentagem de deformação da geomembrana devido a ranhuras presentes no material parcialmente envelhecido. CAZZUFFI & VENESIA (1990) avaliaram a durabilidade

de uma geomembrana de PVC usada como capa impermeabilizante num projeto hidroelétrico em 1963. Foram realizadas análises de TGA, DSC, IR e análise mecânica dinâmica - DMA em duas amostras exumadas após períodos de 10 e 24 anos de instalação. Verificaram-se pequenas diferenças entre as duas amostras em análises de TGA e DSC, enquanto que a TMA revelou um aumento na temperatura de amolecimento (27°C em 1973 para 34°C em 1987) e a DMA apresentou um aumento do módulo de perda dinâmica (aproximadamente 25% em 14 anos). Concluíram os autores que o comportamento após 24 anos foi satisfatório quando comparado ao comportamento após 10 anos de operação. ROWE ET AL. (1998) avaliaram as características de uma geomembrana de HDPE (1,5 mm) utilizada numa lagoa de estabilização de um aterro sanitário após 14 anos de serviço. Verificou-se que a degradação ocorreu por processos oxidativos e fissuração excessiva da geomembrana. A investigação ressalta a importância de antioxidantes e da análise da resistência ao fissuramento para minimização dos processos degradativos. Para os autores, essas propriedades devem ser avaliadas e incorporadas nas especificações de uma geomembrana de HDPE para avaliação de sua qualidade. HSUAN ET AL. (1991) estudaram o desempenho de uma geomembrana de HDPE após sete anos num sistema de contenção de lixívia resultante de resíduos sólidos. Os resultados indicaram que: (1) nenhuma variação macroscópica ocorreu na geomembrana e em suas emendas; (2) não ocorreram variações substanciais na estrutura interna do material devido à constante exposição à intempérie e, (3) as propriedades hidráulicas e mecânicas mantiveram-se inalteradas. EITH & KOERNER (1997) investigaram as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de uma geomembrana de HDPE num aterro sanitário. Não foram verificadas variações nessas propriedades após oito anos de exposição da geomembrana à lixívia.

O PVC é emendado sob condições controladas nas fábricas para produzir painéis maiores reduzindo o número de emendas necessárias em campo. Sabe-se que todas as geomembranas requerem algumas emendas em campo e que estas são as características problemáticas dos sistemas de revestimento. A largura da geomembrana de HDPE está aumentando de forma a minimizar o número de emendas exigidas em campo.

Quando aquecidas pelo sol, as geomembranas costumam apresentar rugas. Em campo, as geomembranas de HDPE apresentam rugas maiores do que as geomembranas de PVC. Essa diferença de comportamento tem sido atribuída ao elevado coeficiente de expansão térmica do HDPE. Em verdade, as geomembranas de HDPE e PVC apresentam coeficientes de expansão térmica semelhantes, mas seus módulos de elasticidade são completamente diferentes. Através de aplicações numéricas é possível prever-se, para um aumento de temperatura da ordem de 40°C, que as rugas em campo podem ser da ordem de 10 cm para geomembranas de HDPE e de 1,0 cm para geomembranas de PVC (GIROUD & MOREL, 1992).

O HDPE possui resistência a puncionamento maior que o PVC, no entanto, este é muito mais maleável que o HDPE antes que os limites de propriedades da geomembrana sejam perdidos. Em essência, cada material comporta-se de maneira diferenciada em cada situação.

As geomembranas de PVC e HDPE possuem vantagens e desvantagens para aplicações específicas. A utilização de uma ou de outra dependerá dos fatores do meio, do tipo de obra e da função a ser executada pelos materiais.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Este capítulo descreve os materiais, métodos e os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios sobre as geomembranas. Estes, por sua vez, foram ensaios de tração, punção, rasgo, densidade, massa por unidade de área (gramatura), variação da espessura, TGA, OIT e MFI em amostras intactas e envelhecidas sob diferentes condições de exposição dos materiais.

Os materiais analisados foram geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (HDPE) e Poli (Cloro de Vinila) (PVC) fornecidas pelas empresas ENGEPOL/S.A. e SANSUY/S.A. As amostras foram analisadas em duas espessuras para cada material: 0,8 mm e 2,5 mm (HDPE); 1,0 mm e 2,0 mm (PVC). Em princípio, estas espessuras foram adotadas arbitrariamente e no decorrer da pesquisa, duas espessuras mais comuns utilizadas na prática foram incorporadas para análises nas geomembranas de HDPE: 1,0 mm e 1,5 mm. As amostras de PVC foram fornecidas em bobinas com aproximadamente 20 metros de comprimento e 4 metros de largura e as amostras de HDPE com dimensões menores de (21 x 30) cm para facilidade de manuseio.

As condições de envelhecimento às quais os materiais foram submetidos estão relacionadas a seguir:

- a) Exposição à intempérie (radiação solar, chuva, vento e umidade);
- b) Exposição a resíduos de esgoto doméstico (lixívia) à temperatura de 30°C em estação de esgoto municipal;
- c) Envelhecimento em banho térmico (água) às temperaturas de 65°C e 85°C;
- d) Compatibilidade química com resíduo de mineração (Nióbio) em envelhecimento acelerado a 50°C;
- e) Envelhecimento em estufa convencional à temperatura de 85°C;
- f) Envelhecimento em estufa com circulação de ar à temperatura de 75°C e,
- g) Envelhecimento simultâneo com radiação Ultra-Violeta (60°C) e processo de Condensação (50°C).

Os ensaios realizados foram:

- a) Determinação da espessura média (ASTM D5199)
- b) Massa por unidade de área (ASTM D3776)
- c) Densidade (ASTM D792)
- d) Ensaio de Tração (ASTM D638)
- e) Ensaio de Punção (ASTM D4833)
- f) Ensaio de Rasgo (ASTM D1004)
- g) Determinação do Índice de Fluidez – MFI (ASTM D1238)
- h) Determinação do Tempo de Oxidação – OIT (ASTM D3895)
- i) Determinação da Perda de Massa (Análise Termogravimétrica– TGA) (ASTM D6370 e E2105)

Através dos ensaios realizados e resultados obtidos foi possível fazer-se comparações entre as amostras intactas e as amostras envelhecidas que foram submetidas aos diferentes processos de envelhecimento.

Em suma, pode-se fazer o seguinte algoritmo para melhor compreensão da pesquisa referente à análise do envelhecimento e/ou degradação das geomembranas analisadas:

- 1) Recebimento, estocagem e identificação das geomembranas através de ensaios padrões de laboratório;
- 2) Escolha dos tipos de processos de envelhecimento aos quais as geomembranas foram submetidas;
- 3) Montagem dos equipamentos e acessórios necessários para envelhecer as geomembranas seja através de ensaios de campo ou de laboratório, conforme as normas específicas;
- 4) Condicionamento das amostras em seus respectivos ambientes de envelhecimento;
- 5) Análises periódicas conforme normas ou interesse particular da pesquisa;
- 6) Realização de ensaios padrões buscando identificar as propriedades de interesse e,
- 7) Comparação dos resultados obtidos entre as amostras intactas e aquelas que sofreram os processos de envelhecimento e/ou degradação.

A Tabela (3.1) apresenta uma síntese dos processos de envelhecimento que foram analisados. A Tabela (3.2) refere-se aos ensaios de propriedades físicas (espessura, densidade e gramatura), propriedades mecânicas (tração, punção e rasgo) e ensaios de MFI, OIT e TGA realizados com suas respectivas normas.

Ressalta-se que o método de ensaio 9090A da EPA recomenda, após períodos de envelhecimentos e/ou exposições, análises em apenas 3 cps para ensaios de tração, rasgo e densidade e

para ensaios de punção, apenas 2 cps. Como não há especificação para a gramatura e espessura, realizaram-se análises em 5 cps.

Tabela 3.1 – Processos de envelhecimento avaliados e seus respectivos períodos de análise

Processo de Envelhecimento	Tempos de Exposição (meses)	Normas (ASTM)	Propriedades Analisadas*
Exposição à Intempérie	6, 12, 18 e 30	D1435/94	
Exposição à Lixívia de Esgoto Doméstico	6, 12, 18 e 30	Método 9090 (EPA); D5747/95 e D5322/92	Espessura Gramatura
Estufa Convencional (85°C)	6, 12, 18 e 30	D794/93 e D5721/02	Densidade Tração
Exposição a Banho Térmico em Água a 65°C e 85°C	6	D5747/95 e D5322/92	Punção Rasgo
Compatibilidade Química com Resíduo de Mineração (Nióbio)	7	Método 9090 (EPA); D5747/95 e D5322/92	OIT MFI TGA
Estufa com Circulação de Ar (75°C)	1, 2, 3, 6 e 14	D5721/02	
Exposição à Radiação UV (60°C) e Condensação (50°C)	1,5 e 6	G53/96	

*Observação: (a) Ensaios de MFI e OIT realizados somente em geomembranas de HDPE; (b) Análises Térmicas não foram realizadas nas amostras expostas à água.

Tabela 3.2 – Ensaaios realizados e respectivas normas

Ensaio	Norma (ASTM)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Propriedades Analisadas	Número de Corpos de Prova (CPs)
Tração	D638/96 (tipo IV)	50	Tensões e alongamentos no escoamento e na ruptura; Módulo de elasticidade inicial	05 (intacta) 03 (exposta) Direções: longitudinal e transversal
Rasgo	D1004/94	51	Força máxima	05 (intacta) 03 (exposta) Direções: longitudinal e transversal
Punção	D4833/88	300	Força na ruptura e Deslocamento	05 (intacta) 02 (exposta)
Espessura	D5199/95	-	Espessura média	10 (intacta) 05 (exposta)
Gramatura	D3776/96	-	Massa por unidade de área	05 (intacta) 05 (exposta)
Densidade	D792/00	-	Massa específica	05 (intacta) 05 (exposta)
MFI	D1238/01	-	Índice de fluidez	03 (intacta) 03 (exposta)
OIT	D3895/02	-	Tempo de oxidação	01 (intacta) 01 (exposta)
TGA	D6370/99 e E2105/00	-	Perda de massa	01 (intacta) 01 (exposta)

A seguir, são apresentados os tipos de envelhecimento aos quais foram submetidas as geomembranas.

3.2 Processos de Envelhecimento

3.2.1. Exposição à Intempérie

Os procedimentos utilizados nesse tipo de envelhecimento seguem as orientações da ASTM D1435/94. Os ensaios descritos nessa norma podem ser utilizados para avaliar a estabilidade de materiais plásticos quando expostos às várias influências existentes na intempérie. As condições de exposição são complexas e variáveis. Importantes fatores incluem o clima, época do ano, precipitação, umidade, presença de atmosfera industrial e variações anuais referentes ao clima. Devido a esses fatores, torna-se difícil medir-se com precisão os resultados da degradação causada por agentes da intempérie e, portanto, os resultados obtidos nesse tipo de análise devem ser tomados apenas como indicativos.

Para uma melhor aceitação dos resultados de exposição em um determinado local, é necessário que se façam exposições repetitivas em diferentes estações e acima do período de um ano. Evidentemente, amostras intactas devem ser usadas para posterior comparação nas avaliações. Exposições em curtos prazos podem fornecer informações relativas acerca do desempenho das amostras expostas, no entanto, não devem ser utilizadas como uma resposta absoluta do desempenho em longo prazo.

A norma em questão recomenda a utilização de suportes para servirem de apoio às amostras que serão expostas. A inclinação desses suportes pode ser feita de acordo com a incidência do sol ao longo do dia sobre as amostras. Os suportes devem ser colocados em locais onde não ocorra a presença de sombras sobre as amostras.

Não há uma especificação precisa a respeito do tamanho das amostras a serem expostas. No entanto, deve-se ter em mente os períodos de análise e as propriedades a serem analisadas em cada

período. Dessa forma, coloca-se nos suportes uma quantidade suficiente de material que possa atender aos objetivos da pesquisa.

Quanto aos períodos de exposição, não há, a rigor, períodos específicos. A recomendação da ASTM D1435/94 é de períodos acima de um mês e não há uma imposição quanto aos períodos de análise ou ao limite de tempo em anos.

Para a realização do envelhecimento natural das amostras aos efeitos climáticos, construiu-se um painel com área de aproximadamente 25 m² no campo de fundações da FEIS – UNESP na área adjacente ao Laboratório de Engenharia Civil. O painel está disposto no eixo Leste-Oeste com inclinação de 22° com o Norte no sentido horário, que é a inclinação onde se obtém a incidência direta do Sol sobre as amostras ao longo do dia. Essa mesma inclinação permite que ao longo do ano as amostras possam receber a maior quantidade de luz solar possível.

As amostras foram colocadas sobre uma tela no referido painel conforme ilustra a Figura (3.1). As amostras de PVC possuíam tamanhos de (2,00 x 2,50)m enquanto que as de HDPE eram relativamente menores (21 x 30)cm.

O período de exposição à intempérie foi de 2,5 anos com análises periódicas a cada seis meses. O início da exposição ocorreu no mês de maio do ano 2000 e seu término no mês de novembro de 2002. Após cada período de análise, as amostras foram retiradas do painel e ensaiadas em laboratório conforme os ensaios descritos anteriormente.

Durante o período de exposição dos materiais foi feito o acompanhamento das principais propriedades climáticas da região através da estação meteorológica instalada no Departamento de Irrigação da Agronomia na FEIS/UNESP. O local situa-se exatamente nas seguintes coordenadas geográficas: 20° 22' S e Longitude: 51° 22'

W. A altitude média é de 335 metros e a Albedo de 0,25 (Superfície vegetada).

Figura 3.1 – Geomembranas expostas à intempérie

Até fevereiro de 2.000, a estação operou com equipamentos analógicos (termômetros de máxima, mínima, bulbo úmido e bulbo seco, heliógrafo, tanque classe A, anemômetro totalizador e pluviômetro), sendo a evapotranspiração calculada pelo método de Penman-FAO. A partir de março de 2.000, a evapotranspiração passou a ser estimada pelo método de Penman-Monteith, a partir dos sensores acoplados ao datalogger CR-23X.

Os Coeficientes utilizados nos cálculos de evapotranspiração por Penman-FAO são:

Coeficiente A: 0,24 (Regressão para estimativa da radiação)

Coeficiente B: 0,52 (Regressão para estimativa da radiação)

A monitorização local é feita através de um Microdatalogger Campbell CR-23X com os seguintes sensores:

- a) Direção e velocidade do vento (Campbell 03001 Wind Sentry)
- b) Evaporação TCA (Campbell Model 255-100 Analog Output Evaporation Gage)
- c) Fluxo de calor no solo (Campbell HFT-3 Soil Heat Flux Plate)
- d) Pluviômetro (Campbell CSI Model CS700-L Rain Gage)
- e) Pressão atmosférica (Campbell CS105 Barometric Pressure Sensor)
- f) Radiação fotossinteticamente ativa (Campbell LI190SB Quantum Sensor)
- g) Radiação global (LI-200X Pyranometer)
- h) Radiação líquida (Campbell Q-7.1 Net Radiometer)
- i) Temperatura do solo (Campbell 107 Temperature Probe)
- j) Temperatura e umidade relativa do ar (Campbell HMP45C Temperature and Relative Humidity Probe)
- k) Tensão do solo (Campbell Modem 257 and 257-L Soil Moisture Sensor)

3.2.2 Exposição à Lixívia de Esgoto Doméstico

Essa etapa de análise segue as recomendações especificadas nas normas ASTM D5747/95 e D5322/92.

A norma D5747/95 recomenda procedimentos de ensaios para a avaliação da resistência química de geomembranas a resíduos líquidos, soluções químicas preparadas e lixívias de resíduos sólidos. É usada em conjunto com a D5322/92. O objetivo dessa norma é fornecer uma lista de procedimentos para programas de ensaios que possam investigar a resistência química de uma geomembrana em

contato com diferentes soluções líquidas. O método de ensaio D5322/92 refere-se a procedimentos padrões de imersão para investigar a resistência química de um geossintético a um resíduo líquido, lixívia ou agente químico. As condições especificadas têm a intenção de fornecer uma base de padronização assim como de servir de guia para a comparação ou investigação da resistência química de materiais geossintéticos.

O local utilizado para esta etapa de envelhecimento localiza-se na central de esgoto da cidade de Ilha Solteira. O período de exposição das amostras foi de 2,5 anos, com análises periódicas a cada seis meses. O experimento teve início no mês de junho de 2000. O esgoto é constantemente circulado, não havendo o perigo de incrustação ou deposição do mesmo sobre as amostras.

As amostras foram dispostas dentro de caixas d'água com capacidade de 1000 litros onde ocorre a circulação do esgoto conforme ilustram as Figuras (3.2) a (3.4).

Foram realizadas sete campanhas para a obtenção dos valores médios das principais propriedades da lixívia, a saber: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais, amônia e NTK. Essas campanhas tiveram início no primeiro semestre de 1999 (Pesquisa anterior em andamento) e se estenderam até o segundo semestre de 2002. Em cada semestre foram realizadas, mensalmente, leituras diárias que começavam na parte da manhã e se estendiam até o final da tarde. As análises foram efetuadas no laboratório de hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

Figura 3.2 – Caixas d'água para armazenamento das geomembranas e circulação da lixívia de esgoto doméstico

Figura 3.3 – Geomembranas de PEAD imersas na lixívia

Figura 3.4 – Geomembranas de PVC imersas na lixívia

3.2.3 Envelhecimento Térmico em Estufa Convencional

Esta etapa consiste na análise do envelhecimento de amostras através de temperatura elevada em estufa sem circulação de ar a uma temperatura constante de 85°C. Esse valor de temperatura é relativamente alto uma vez que as geomembranas dificilmente encontrarão essa temperatura em campo. A norma GM13 do GRI (*Geosynthetics Research Institute*) recomenda a utilização dessa temperatura para medidas do tempo de oxidação das amostras após 90 dias sob efeitos do calor. Esse período de 90 dias é um período extremamente curto considerando-se as previsões de vida útil das geomembranas. Dessa forma, procurou-se manter a incubação sob o valor de temperatura descrito para a avaliação das propriedades da

geomembrana em longo prazo. Os períodos de análise foram de 2,5 anos, com análises a cada seis meses.

O método de ensaio utilizado como referência é a norma ASTM D794/93, que procura definir condições de ensaios de resistência de materiais plásticos a variações em suas propriedades devido a exposições elevadas de temperatura. Essa norma especifica somente o procedimento para a exposição ao calor e não faz referências aos métodos de ensaio ou aos corpos de prova. O efeito do aquecimento sobre uma propriedade pode ser determinado pela seleção de um método de ensaio apropriado e das amostras.

A Figura (3.5) ilustra amostras de geomembranas amarradas sobre um suporte de madeira para serem condicionadas dentro da estufa. Foram utilizados, entre as amostras, pedaços de cartolina grossa para impedir o contato entre as mesmas. A Figura (3.6) ilustra as amostras de geomembranas dispostas dentro da estufa.

Após cada período especificado foram retiradas amostras de PVC e HDPE para posterior análise de suas propriedades.

Figura 3.5 – Suporte de madeira com amostras de geomembranas

Figura 3.6 – Estufa com amostras de geomembranas de HDPE e PVC

Basicamente, este processo de envelhecimento é extremamente simples uma vez que consta apenas da análise das propriedades físicas e mecânicas depois de determinados períodos de envelhecimento das geomembranas dentro da estufa com temperatura constante.

3.2.4 Envelhecimento Térmico em Estufa com Circulação de Ar

As referências utilizadas para esse tipo de ensaio foram as normas ASTM D794/93 e D5721/95.

O método de ensaio D5721/95 procura fornecer uma estimativa da resistência de geomembranas de poliolefinas ao envelhecimento térmico na presença de ar. Somente o procedimento de exposição ao calor é especificado. Esse método pode ser usado como um guia de comparação de características de envelhecimento térmico de materiais quando forem feitas avaliações em determinadas propriedades de interesse.

Sob as condições severas desse ensaio, as amostras são sujeitas à degradação a uma taxa que é função da resistência térmica da geomembrana em análise. A temperatura elevada para esse método deve representar condições que são suficientemente severas para induzir a ruptura de geomembranas de poliolefinas em um breve período de tempo.

A estufa deve estar de acordo com as características do tipo 11B das especificações da norma ASTM E145 (*Specifications for Gravity-Convection and Forced – Ventilation Ovens*).

O procedimento é análogo ao especificado no método de ensaio D794/93 e a D5721/95 recomenda alguns ensaios após os períodos de análise, a saber: propriedades de tração, índice de fluidez e densidade.

O equipamento deve ser uma estufa com controle horizontal ou vertical de fluxo de ar. O suporte para as amostras deve ser de tal maneira que permita a circulação de ar entre as mesmas. Com relação às amostras, a norma recomenda que o número e tipo de amostras de ensaio devem estar de acordo com os métodos de ensaio referentes às propriedades que serão analisadas. O procedimento de ensaio pode ser feito por contínuo aquecimento das amostras onde a temperatura utilizada deve estar próxima à máxima temperatura suportada pelo polímero em avaliação. Posteriormente, pode-se ir diminuindo a temperatura e realizando-se novas avaliações. A ASTM D794 recomenda divisões por 25, ou seja, se a máxima temperatura for de 85°C, a análise seguinte deverá ser a 60°C. Os períodos de exposição podem variar de minutos a semanas.

Semelhantemente ao processo de envelhecimento em estufa convencional, essa etapa da pesquisa difere daquela em relação ao equipamento utilizado, aos períodos analisados e à temperatura de ensaio.

O equipamento utilizado para o envelhecimento térmico é uma estufa com circulação de ar com controle automático de temperatura e programações variadas de ciclos de aquecimentos. A temperatura de análise utilizada foi de 75°C. A escolha desse valor é justificada pelo já exposto no item anterior. O valor difere um pouco do valor estipulado na estufa convencional para que se possa efetuar uma posterior comparação com os resultados obtidos na estufa convencional uma vez que, teoricamente, a circulação do ar irá afetar mais drasticamente as geomembranas.

A Figura (3.7) ilustra a estufa com circulação de ar e a Figura (3.8), a disposição das amostras dentro da estufa. Esse tipo de equipamento é mais desejável em nível de pesquisas uma vez que a maioria das especificações referentes a processos de envelhecimento térmico faz menção ao mesmo. Todas as especificações das normas ISO se referem a esse tipo de equipamento para análises térmicas. Evidentemente, trata-se de equipamento mais moderno quando comparado à estufa convencional.

(a)

(b)

Figura 3.7 – (a) Vista da estufa com circulação de ar (b) disposição das amostras na estufa

3.2.5 Envelhecimento Acelerado em Banho Térmico com Água e Compatibilidade Química com Resíduo de Mineração (Nióbio)

O procedimento utilizado nessa fase da pesquisa segue as orientações do método de ensaio ASTM D5322/92 que faz recomendações quanto à forma de exposição dos materiais poliméricos imersos em substâncias diversas.

Segundo a norma D5322 e o método de ensaio 9090 da EPA, não há especificação para o tamanho do tanque. Este deve ter dimensões tal que o material imerso no líquido sofra o ataque deste. Se tanques grandes não são possíveis, pode-se utilizar tanques menores desde que após cada período de exposição o líquido de imersão seja recolocado. Para prevenir a perda de componentes voláteis, o tanque deve ser fechado com um material que resista quimicamente ao líquido. Deve-se manter a pressão atmosférica no tanque (suspiro).

Quanto aos reagentes, a norma afirma que o usuário deve determinar a correta solução para uso na aplicação particular. Os tipos mais comuns são geralmente resíduos líquidos, lixívia colhidas de obras, lixívia feitas de resíduos sólidos, lixívia sintéticas feitas de produtos químicos de laboratório, soluções químicas padrões (Norma ASTM D543) e combustíveis e óleos (ASTM D471). As soluções devem conter produtos químicos perigosos (norma ASTM D543). Os procedimentos de ensaio devem ser realizados conforme a ASTM D5747.

De acordo com a ASTM D543, para se isolar os efeitos de certos reagentes químicos nas propriedades mecânicas de alguns plásticos, é necessário ensaiar amostras idênticas após imersão em água. Isso principalmente para soluções aquosas onde pode não haver diferenças efetivas dos efeitos da imersão na água isolada. Quando os ensaios são realizados com uma variedade de soluções

aquosas, os efeitos devido à água devem ser analisados para uma melhor comparação dos resultados. Um comportamento similar pode resultar quando ensaios são conduzidos a elevadas temperaturas, necessitando-se, dessa forma, o conhecimento dos efeitos da temperatura isoladamente para posterior análise dos efeitos dos reagentes químicos. Com base nessa informação, os ensaios de envelhecimento realizados nas geomembranas em estufas convencionais e com circulação de ar, podem ser úteis na quantificação dos resultados das variações das propriedades devido aos efeitos de exposição química.

As normas referentes a ensaios acelerados de laboratórios para materiais poliméricos fazem referência à colocação destes em ambientes agressivos com temperaturas elevadas. Nessa pesquisa, fez-se a montagem de equipamento (Figura 3.9) para promover o envelhecimento acelerado das amostras em contato com reagentes e soluções agressivas variadas. No entanto, nessa fase do trabalho, as análises foram realizadas apenas com água e um resíduo de mineração (Nióbio).

O equipamento é composto de uma caixa d'água com capacidade de 250 litros, uma resistência blindada de 9000 volts, um contator eletromecânico, termostato para controle da temperatura e tampa. Utilizou-se água destilada para o banho nas amostras expostas. A Figura (3.9) apresenta em seqüência: (a) o detalhe da parte elétrica responsável pelo aquecimento; (b) a caixa vazia com a resistência; (c) o suporte com as amostras; (d) a disposição final do conjunto para ensaios com água; (e) recipientes de aço inoxidável para armazenar o nióbio e, (f) disposição final de ensaio para o nióbio.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 3.9 – Detalhes do equipamento para promover o envelhecimento acelerado das amostras de geomembranas em contato com água e com o nióbio

Para a análise da compatibilidade química do Nióbio com as geomembranas foram utilizados recipientes em aço inoxidável para conter o resíduo e as geomembranas (Figuras 3.9e e 3.9f). Os recipientes possuem capacidade de 20 litros. Foram utilizados dois recipientes: um para conter as geomembranas de PVC e outro para as de HDPE. Os procedimentos para a incubação seguem as prescrições da ASTM D5747 e do método de ensaio 9090 da EPA.

O elemento nióbio (Nb) é um metal de transição que, com o vanádio e o tântalo, integra o grupo 5b da tabela periódica. É usado em ligas, imã supercondutor e, em pequenas quantidades, em aços inoxidáveis para evitar corrosão intergranular. Com um número atômico igual a 41, seu ponto de fusão é de 2.468°C e sua densidade igual a 8,57 a 20°C. Na única fonte de nióbio do País (Araxá), as atividades de mineração são feitas a céu aberto e sem explosivos. O rejeito do nióbio é depositado em barragens. Esse rejeito foi utilizado na pesquisa para avaliação de sua compatibilidade com geomembranas de HDPE e PVC.

O período de análise foi de seis meses de exposição das amostras em água a temperaturas de 65°C e 85°C. A compatibilidade com o Nióbio foi avaliada após sete meses de exposição. O concentrado flutuado do nióbio possui um teor de 60% de Nb₂O₅. As análises foram efetuadas de acordo com os ensaios físicos e mecânicos citados anteriormente.

3.2.6 Envelhecimento por Radiação Ultravioleta (60°C) e Processo de Condensação (50°C)

Para o estudo dos efeitos provocados pela ação dos raios ultravioletas (UV) nas geomembranas foi necessário construir-se um equipamento que simula, simultaneamente, em laboratório, os efeitos

dos raios solares na faixa UV e da chuva ou orvalho. Os procedimentos para a montagem do equipamento e a realização dos ensaios foram seguidos conforme orientações e sugestões da norma ASTM G53.

As amostras são expostas aos raios UV e à condensação em ciclos repetitivos. A fonte UV consiste em um arranjo de lâmpadas fluorescentes com emissão de luz na faixa UV. A condensação é produzida pela exposição da superfície das amostras ao aquecimento, misturas saturadas de ar e vapor d'água. O lado oposto das amostras deve ficar em contato com a temperatura ambiente da sala. Com relação ao equipamento, a ASTM G53 faz referência a um material resistente à corrosão, um recipiente com água aquecida e um suporte para as amostras e controladores de temperatura. As lâmpadas devem ficar em duas fileiras opostas sendo que de cada lado devem ficar quatro lâmpadas. As características dessas lâmpadas são: fluorescentes na faixa UV-B (280nm a 315nm) com pico de emissão a 313 nm, comprimento de 1220 mm, potência de 40 watts e corrente elétrica de 430 mA a 102 V. A área de exposição das amostras deve ser de 900 mm de largura e 210 mm de altura para cada lado. Lâmpadas na faixa UV-A (pico de emissão a 340nm) também podem ser utilizadas.

Para que o processo de condensação ocorra é necessário o aquecimento da água sob o recipiente onde estarão as amostras. O suporte e as amostras devem constituir as paredes da câmara. A água pode ser potável ou deionizada. Nesse particular, é necessário que se mantenha o nível de água dentro do reservatório sempre constante uma vez que há evaporação pelo aquecimento.

A norma sugere que se não houver especificação de ciclos de ensaios, estes devem ser de 4 horas de UV a 60°C e 4 horas de condensação a 50°C. Outros ciclos são largamente utilizados: 4h UV/4h condensação e 8h UV/4h condensação. Ensaios de UV a 50,

60 e 70°C são também empregados. A condensação é comumente feita a 50°C. Os períodos recomendados pela norma para a realização dos ciclos de UV e condensação são de quatro dias, 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 12 semanas. A Figura seguinte ilustra o equipamento montado no laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

Figura 3.10 – (a) Detalhe da calha (b) Detalhe das lâmpadas UV (c) Lâmpadas em funcionamento (d) Amostras de geomembrana expostas

O suporte para o equipamento foi construído com barras de ferro com pintura resistente à corrosão e o sistema de armazenamento de água consiste em um reservatório na forma de uma calha. O aquecimento é feito com resistências blindadas e o

controle da temperatura por meio de um contator eletromecânico e um termostato. Para manter o nível de água constante, adotou-se um sistema de bóia externa que regula o nível de água dentro da calha. Esse detalhe é importante uma vez que o nível de água dentro do reservatório deve permanecer sempre constante para que não ocorra aquecimento da resistência na ausência de água.

Os ciclos de exposição utilizados foram de 4 horas de radiação UV a 60°C e 4 horas de condensação a 50°C. Para tanto, utilizaram-se resistências que trabalham a seco dentro da câmara UV para que a temperatura ambiente atingisse 60°C. Com o auxílio de um temporizador (*timer*) as lâmpadas UV e as resistências eram automaticamente desligadas e a resistência imersa era acionada para que o processo de condensação ocorresse a 50°C. Findo o processo de condensação, automaticamente, reiniciava-se o processo de radiação UV a 60°C.

Os períodos de análise foram de um mês e meio (45 dias) e de seis meses.

3.3 Equipamentos Utilizados para os Ensaios de Propriedades Físicas e Mecânicas

Para a realização dos ensaios de tração e de punção, utilizou-se o equipamento disponível no laboratório de geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (USP). O equipamento para a realização desses ensaios (Figura 3.11) possui características próprias de controle e execução dos ensaios assim como de aquisição e armazenamento diretamente dos resultados obtidos via interface gráfica com um microcomputador acoplado ao sistema. Para a realização dos ensaios de tração, punção e rasgo, há a necessidade de se utilizar moldes para a confecção dos corpos de prova. A seguir,

apresentam-se os moldes utilizados e seus respectivos corpos de prova referentes aos ensaios de propriedades mecânicas.

Figura 3.11 - Equipamento utilizado para a realização de ensaios em geomembranas

Figura 3.12 – Moldes utilizados na confecção dos corpos de prova

Figura 3.13 – Corpos de prova (ensaios de propriedades mecânicas)

3.3.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados conforme prescrição da norma ASTM D638. São utilizados 5 corpos de prova em cada direção (longitudinal e transversal). Os corpos de prova utilizados para esse tipo de ensaio possuem a forma de “halteres” (gravata) conforme ilustrado anteriormente. A Figura (3.14) apresenta a ilustração de um ensaio de tração em andamento.

Para a entrada de dados no equipamento descrito anteriormente, utilizam-se os valores originais de largura e espessura das amostras. Dessa forma, ao término do ensaio, o equipamento fornece os valores de tensão de ruptura, da deformação obtida, da força máxima e do módulo de elasticidade do material.

Para as membranas de PVC, as curvas obtidas nos ensaios caracterizam-se por uma tensão máxima correspondente à ruptura atingida para um determinado valor de deformação. Esses valores são da ordem de 20 MPa de tensão na ruptura e 480% de deformação. Para as membranas de HDPE ocorre o surgimento de uma tensão de escoamento que é assumida como sendo a tensão de

ruptura (variando desde 12 até 22 MPa) associada a uma deformação que também pode variar de 9 a 18%. Essa tensão de escoamento tende a decrescer ligeiramente até deformações da ordem de 500%. Caso prossiga o carregamento, ocorrerá finalmente a ruptura física para deformações da ordem de 1000 a 1300%.

Figura 3.14 – Ensaio de tração em andamento

3.3.2 Ensaio de Punção

O ensaio de punção é realizado através do puncionamento de uma amostra circular em um cilindro vazado com 45 mm de diâmetro conforme prescrição da ASTM D4833. São utilizadas 15 amostras para cada espessura. Um pequeno pistão com 8 mm de diâmetro com a extremidade chanfrada é pressionada no centro da amostra que está fixa no cilindro até que ocorra o seu puncionamento (Figura 3.15). A velocidade recomendada de aplicação da carga é de 300 mm/min. A resistência ao puncionamento é tomada como a máxima carga registrada durante o ensaio.

Figura 3.15 – Cilindro e pistão utilizados no ensaio de punção

Figura 3.16 – Equipamento utilizado para o ensaio de punção

Os valores de resistência ao puncionamento para geomembranas não-reforçadas estão geralmente compreendidos entre 50 e 500 N e para geomembranas reforçadas entre 200 e 2000 N. A presença de geotêxteis acima ou abaixo de geomembranas não-

reforçadas aumenta consideravelmente sua resistência ao puncionamento.

Os ensaios de punção em laboratório são geralmente considerados ensaios índices por serem realizados em amostras de dimensões relativamente pequenas e por não haver relação aceitável entre os valores obtidos nos ensaios e o comportamento real de campo. Estes ensaios, no entanto, oferecem valores de resistência ao puncionamento que proporcionam uma comparação entre diferentes tipos de geomembranas.

3.3.3 Ensaio de Rasgo

A resistência ao rasgo de placas ou filmes plásticos é uma função complexa de sua resistência última à ruptura. A geometria da amostra e a velocidade de ensaio são controladas para produzir o rasgo numa pequena área sujeita à concentração de tensão a taxas menores do que as que são usualmente encontradas em condições de serviço. O ensaio de rasgo é também considerado um ensaio índice pelo fato das amostras possuírem tamanho bastante reduzido.

Os ensaios de rasgo foram realizados de acordo com a norma ASTM D1004. Nesse tipo de ensaio, a norma recomenda a utilização de 10 corpos de provas em cada direção. A forma desses corpos de prova está ilustrada anteriormente nos quais pode-se notar um ângulo de 90° em sua parte central. Nessa seção ocorre concentração de tensão e o efeito de rasgo pode então ser notado. Com as duas extremidades da amostra presas às garras de ensaio, o rasgo começa a se propagar ao longo da direção perpendicular da aplicação da carga com velocidade de 51 mm/min. A resistência é tomada como a força máxima encontrada durante o ensaio. Segundo

esta norma, os corpos de prova utilizados no ensaio devem apresentar variação de espessura máxima da ordem de 10 % (com medida sob tensão de 175 kPa).

Figura 3.17 – Ensaio de rasgo em andamento

3.3.4 Determinação da Espessura

Esse método de ensaio é utilizado para medir a espessura de geotêxteis e geomembranas. A espessura avaliada é a espessura nominal e não a espessura mínima. Segundo a ASTM D5199, a definição de espessura é: (1) a distância entre uma superfície plana e sua superfície oposta paralela (plana); (2) nos têxteis, a distância entre as superfícies superior e inferior do material medidas sob pressão e tempo específicos.

A espessura é uma das características físicas básicas usadas para o controle de qualidade de geotêxteis e geomembranas. Os valores são necessários em vários parâmetros, a saber, coeficiente de permeabilidade e ensaios de tração.

A espessura nominal de geotêxteis e geomembranas é determinada observando-se a distância perpendicular que um plano móvel é deslocado de uma superfície paralela no material enquanto este está sob uma pressão específica: 2 kPa para geotêxteis e 20 kPa para geomembranas num tempo de 5 segundos. No entanto, segundo a norma, pode ocorrer que em algumas geomembranas de HDPE, uma pressão de apenas 2 kPa seja inadequada para a avaliação da espessura. Em tais casos, se houver suspeitas quanto à determinação da espessura, pode-se utilizar uma pressão que varia de 50 a 200 kPa para geomembranas de HDPE.

A Figura (3.18) ilustra o procedimento utilizado para a determinação das espessuras de geomembranas de PVC e de HDPE conforme recomendação da ASTM D5199.

Figura 3.18 – Determinação da espessura de geomembranas

As amostras utilizadas devem possuir dimensão mínima de 100 mm perfazendo um total de 10 amostras. Para a medida da espessura, inicialmente é preciso adotar uma referência como sendo o ponto zero no extensômetro através da aplicação da pressão estabelecida sobre uma base uniforme. Em seguida, coloca-se a membrana sob pressão específica por 5 segundos sobre essa base

verificando-se a nova leitura que corresponderá à espessura da amostra. A espessura nominal será a média dos 10 valores determinados.

3.3.5 Determinação da Densidade¹

Para a determinação da densidade das amostras, utilizou-se o princípio físico de Arquimedes para a determinação do volume dos corpos de prova e posteriormente de suas densidades. Foram utilizados 10 corpos de prova com dimensões de (10x10)cm. A Figura (3.19) ilustra o procedimento utilizado para a determinação do volume das amostras.

Figura 3.19 – Determinação do volume das amostras pelo princípio de Arquimedes

---

¹ Fisicamente, o conceito de densidade está errado. A densidade é uma grandeza adimensional. A definição de massa específica é mais aplicável uma vez que se trata de relação de massa por volume com grandezas envolvidas.

3.3.6 Determinação da Massa por Unidade de Área

A massa por unidade de área é determinada pela pesagem de amostras de ensaio de dimensões conhecidas retiradas de diferentes posições da amostra recebida em laboratório. A média dos valores constituirá então a massa por unidade de área da amostra.

O método de ensaio é usado para determinar se o material está de acordo com as especificações referentes ao mesmo. É usado para o controle de qualidade das amostras e pode ser usado na avaliação de amostras comerciais. Esse ensaio foi realizado de acordo com a ASTM D3776/96.

O ensaio é extremamente simples uma vez que necessita apenas de uma balança com capacidade de 5000 gramas e precisão de 0,01 g. As amostras do material são divididas em lotes. Em seguida, são retiradas amostras na diagonal do lote a ser ensaiado de acordo com a ASTM D4354 (*Practice for Sampling of Geosynthetics for Testing*). As amostras que serão ensaiadas devem possuir área mínima de 100 cm². Normalmente, são utilizadas dimensões de (10 x 10) cm em número mínimo de 5 amostras. A massa por unidade de área é obtida pelo valor médio da razão das massas das amostras (em gramas) pela área destas (em m²).

3.3.7 Determinação do Índice de Fluidez (MFI)

O ensaio de Índice de Fluidez (MFI) ou simplesmente “MI” ou “IF” é usado para controlar a uniformidade do polímero através da extrusão do mesmo sob pressão e temperatura específicas. O ensaio determina a fluidez das membranas sob carga constante para empurrá-las através de um orifício normalizado. Normalmente utiliza-

se a norma ASTM D1238 para a obtenção dos valores de MFI. Esta norma inclui a definição do tipo de aparelho a ser empregado, as dimensões do orifício para a extrusão do polímero, condições de ensaio em termos da massa que irá ocasionar a extrusão e, a temperatura de ensaio correspondente a cada polímero. Esse tipo de ensaio é utilizado apenas para o HDPE e não se recomenda sua determinação para o PVC devido à quantidade de voláteis e plastificantes presentes em sua composição.

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

(a)

(b)

Figura 3.20 – (a) Equipamento para determinação do MFI (b) detalhe das amostras extrudadas

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

3.3.8 Determinação do Tempo de Oxidação (OIT)

Esse ensaio foi realizado no DEMA (UFSCar) de acordo com os procedimentos da norma ASTM D3895. O equipamento específico utilizado para a realização dos ensaios está ilustrado na Figura (3.21).

Figura 3.21 – Equipamento para realização de ensaio DSC com OIT

Os resultados foram obtidos graficamente via interface gráfica e software específico. Esse tipo de ensaio é utilizado somente para as geomembranas de HDPE. A massa das amostras utilizadas deve estar na faixa de 5 a 10 mg. Durante a realização do ensaio, deve-se evitar o contato manual com a amostra e com o recipiente (panelinha). Para tanto, as amostras foram cortadas em suas superfícies utilizando-se a parte interna destas para a realização dos ensaios. No caso específico do ensaio de DSC com OIT, a panelinha deve ficar aberta para que possa ocorrer a oxidação do material. No ensaio convencional a panelinha é vedada. As amostras foram equilibradas na temperatura de 30°C no equipamento. Em seguida, realizou-se uma rampa de aquecimento a uma taxa de 10°C/min até a temperatura de 200°C. Nessa fase do ensaio foi utilizado o nitrogênio (N₂) super seco FID 4.6. Ao atingir 200°C, realizou-se uma isoterma à mesma temperatura por 5 minutos. Em seguida, o equipamento efetuou a mudança automática de gás passando a injetar oxigênio a uma taxa de 50 ml/min na amostra por um período de 100 minutos a 200°C. O valor do Tempo de Oxidação das amostras (OIT) é obtido graficamente verificando-se o tempo decorrido desde o início da aplicação do oxigênio até a oxidação completa do material. Essa fase final é retratada graficamente pelo aparecimento de um pico de oxidação (Figura 3.22).

Figura 3.22 – Curva térmica para obtenção do valor do OIT (modificado de HSUAN & KOERNER, 1998)

3.3.9 Análise Termogravimétrica (TGA)

Esse tipo de ensaio permite avaliar a perda de massa dos materiais poliméricos em função do aumento de temperatura. As amostras ensaiadas possuíam uma massa que variou de 10 a 15 mg para se manter um mesmo padrão de medida. O equipamento utilizado foi o do tipo NETZSCH (série TG 209) do laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Física da FCT-UNESP em Presidente Prudente (Figura 3.23). Esse tipo de equipamento possui software exclusivo que permite a aquisição direta dos dados assim como o monitoramento do ensaio.

As amostras foram colocadas num recipiente aberto (panelinha de platina) e aquecidas a uma taxa de 20°C/min. A faixa de temperatura utilizada variou da temperatura ambiente (esta ficou sempre próxima a 23°C) até a temperatura de 700°C em uma atmosfera saturada de nitrogênio. Essa temperatura final é suficiente para oxidar qualquer substância presente nas amostras. Comumente, os resultados são apresentados em gráficos contendo no eixo das ordenadas a porcentagem em peso perdida *versus* o valor da temperatura no eixo das abscissas. Variações acentuadas de decréscimo de peso refletem a vaporização de componentes específicos presentes nas amostras.

Como explicitado anteriormente, as curvas obtidas na TGA para o PVC apresentam dois processos de decomposição às temperaturas de 270° e 352°C. O primeiro processo inclui a desidrocloração dos polienos (perda de HCl do polímero) e a degradação dos plastificantes. O segundo processo corresponde à degradação dos polienos, ou seja, a porcentagem do polímero residual. Após este processo se completar introduz-se oxigênio (normalmente a 550°C) para que ocorra a oxidação do negro de fumo

e da resina carbonácea. O resíduo final corresponde ao teor de cinza. Como os ensaios de TGA foram realizados em atmosfera nitrogenada provavelmente os resíduos obtidos acima de 500°C são resultantes do negro de fumo, da resina carbonácea e do teor de cinzas.

Figura 3.23 – Equipamento utilizado nos ensaios de TGA

Para a identificação dos parâmetros obtidos no ensaio (Figura 3.24), adotou-se a mesma convenção de MAIA (2001), a saber:

- (A) - degradação do plastificante, perda de HCl da cadeia do polímero e temperatura correspondente;
- (B) - Polímero residual e temperatura correspondente e,
- (C) - Resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e cinza (removidos acima de 500°C).

Figura 3.24 – Ilustração dos Parâmetros obtidos no ensaio de TGA para uma amostra de PVC

Como o ensaio de TGA possibilita a quantificação da perda de massa ocorrida para as geomembranas, foi possível fazer a estimativa da quantidade perdida de plastificante (parâmetro A) para o PVC após os processos de envelhecimento.

4 – RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

4.1. Introdução

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos e suas respectivas análises. Para melhor visualização, os resultados foram organizados em tabelas e em gráficos e referem-se às amostras de geomembranas de PVC com espessuras de 1,0 e 2,0 mm e de HDPE (PEAD) de 0,8 e 2,5 mm. Ressalta-se que nas análises da degradação em estufa com circulação de ar e exposição à radiação UV, foram analisadas também, geomembranas de HDPE com espessuras de 1,0 e 1,5 mm. Além disso, na exposição à radiação UV foi analisada uma geomembrana de HDPE (1,0 mm) de cor branca.

No item (4.2) são traçados breves comentários sobre o comportamento observado dos materiais expostos. Posteriormente, apresenta-se a discussão dos resultados obtidos no item (4.3).

4.2. Apresentação dos Resultados

Os resultados obtidos para os ensaios efetuados sobre as amostras intactas e envelhecidas pelos diferentes processos encontram-se em anexo na forma de tabelas.

4.2.1. Propriedades de Tração das Amostras Intactas

As Figuras (4.1) a (4.3) apresentam as curvas obtidas para os ensaios de propriedades mecânicas realizados nas amostras

intactas (sem qualquer condicionamento). Não serão apresentados no corpo do texto, os gráficos referentes às amostras envelhecidas. Estes resultados estão sumarizados nas tabelas em anexo.

As propriedades mecânicas obtidas para o PEAD e para o PVC estão de acordo com as especificações dos fabricantes e com os valores correntes da literatura. Nota-se que no escoamento, o PEAD apresenta uma resistência média à tração que varia de 12 a 18 MPa, aproximadamente, com deformações correspondentes de 13 a 18%. A resistência média à tração para o PVC foi de 18 MPa com uma deformabilidade de 480 a 500% na ruptura. Os demais valores de resistência ao puncionamento e ao rasgo também estão de acordo com os valores de especificação. As Tabelas em anexo (A.1 a A.3) apresentam os valores obtidos para os ensaios de índices físicos (espessura, gramatura e densidade) e de propriedades mecânicas (tração, punção e rasgo) nas direções longitudinal (L) e transversal (T) realizados nas amostras intactas.

Observação: Amostra virgem

HDPE 0.8 mm Longitudinal

Observação: Amostra virgem

HDPE 2.5 mm Longitudinal

Observação: Amostra virgem.

PVC 1.0 mm Longitudinal

Observação: Amostra virgem

PVC 2.0 mm Longitudinal

Figura 4.1 – Curvas dos ensaios de tração das amostras virgens

Observação: Amostra virgem

HDPE 0.8 mm Longitudinal

Observação: Amostra Virgem

HDPE 2.5 mm Longitudinal

Observação: Amostra virgem

PVC 1.0 mm Longitudinal

Observação: Amostra virgem

PVC 2.0 mm Longitudinal

Figura 4.2 – Curvas dos ensaios de Rasgo das amostras virgens

HDPE 0.8 mm Longitudinal

HDPE 2.5 mm Longitudinal

PVC 1.0 mm Longitudinal

PVC 2.0 mm Longitudinal

Figura 4.3 – Curvas dos ensaios de Punção das amostras virgens

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos após os respectivos processos de envelhecimento. Estes, são apresentados inicialmente, na forma de diagramas e, em seguida, apresentando as variações das propriedades em função do tempo de exposição. Os diagramas mostram um comparativo das propriedades referentes às amostras intactas (consideradas como valor absoluto de 100%) em relação às propriedades dos respectivos processos de envelhecimento (que estarão abaixo ou acima da referência de 100% conforme diminuam ou aumentem em relação à propriedade original).

As Tabelas (A.4) a (A.40), em anexo, apresentam os resultados das propriedades mecânicas para as amostras que sofreram os processos de envelhecimento, a saber: intempérie, esgoto, estufa convencional a 85°C, estufa com circulação de ar a 75°C, envelhecimento acelerado em água a 65°C e 85°C, exposição a um resíduo de mineração (Nióbio), envelhecimento simultâneo por radiação de raios ultravioleta (60°C) e processo de condensação (50°C).

4.2.2. Propriedades de Tração das Amostras Expostas à Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional

As principais propriedades analisadas da lixívia utilizada encontram-se na Tabela (A.14). Os dados referentes ao acompanhamento meteorológico encontram-se nas Tabelas (A.15) a (A.17). Esses dados referem-se aos períodos dos anos 2000 (janeiro) a 2002 (dezembro) quando os materiais foram retirados do painel de exposição. As Figuras (4.4) a (4.17) ilustram as variações ocorridas nas propriedades mecânicas das geomembranas expostas.

Observa-se que a resistência à tração para o PVC sofre pequenas variações de aumento ou diminuição independentemente

do processo de exposição avaliado. Ao final de 30 meses, percebe-se que as variações ocorridas não ultrapassaram a faixa de 10%. Para o HDPE, nota-se que apesar das oscilações observadas, as variações após 30 meses de exposição foram pouco significativas considerando-se os efeitos da intempérie e lixívia. A exposição à estufa teve um impacto maior sobre a propriedade. As variações observadas variaram de 5 a 23% após os 30 meses.

Com relação à deformabilidade, O PVC apresentou decréscimo para todas as espessuras depois de 12 meses após exposição ao calor em estufa. O maior valor observado foi um decréscimo de 45% (PVC 2T) comparado ao valor inicial. Em média, a propriedade decresceu 40% do valor original. Para o HDPE, observa-se que após 30 meses de análise, ocorreram aumentos na deformabilidade em relação ao período anterior para todas as exposições. Em relação às amostras intactas, os aumentos foram de 6 a 27% (intempérie), 1 a 20% (lixívia) e 15 a 33% (estufa) no período final de análise.

Figura 4.4 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 6 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.5 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 12 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.6 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 18 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.7 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 30 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.8 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 6 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.9 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 12 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.10 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 18 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.11 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 30 meses de envelhecimento (Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional)

Figura 4.12 – Variação das Propriedades de tração após exposição à intempérie

Figura 4.13 – Variação das Propriedades de tração após exposição à lixívia

Figura 4.14 – Variação das Propriedades de tração após exposição à estufa convencional

Figura 4.15 – Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à intempérie

Figura 4.16 – Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à lixívia

Figura 4.17 – Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à estufa convencional

4.2.3. Propriedades de Tração das Amostras Expostas à Estufa com Circulação de Ar

As Figuras (4.18) a (4.23) ilustram as variações ocorridas nas propriedades mecânicas após os períodos específicos de exposição.

Nota-se que o PVC de 1,0 mm após 1, 2, 3 e 6 meses apresentou poucas variações na resistência à tração. No entanto, após 14 meses, percebe-se que houve aumento na propriedade (não superior a 10%) para todas as espessuras. O PEAD de 1,0 mm apresenta valores crescentes de resistência desde o 1º mês atingindo 35% no 3º mês (PEAD 1,0L). Após 14 meses, os valores de deformabilidade apresentaram diminuição mais acentuada para as

geomembranas de PVC com menor espessura. Para o PEAD, nota-se que a propriedade variou da ordem de 30 a 33% em comparação às amostras intactas. A deformabilidade aumentou para o PEAD 1,0 mm após 1, 2 e 3 meses (variação de 28%). Após 6 e 14 meses os valores atingiram 35% de aumento. Para o PEAD de 1,5 mm, os aumentos foram progressivos nos primeiros meses. Após 14 meses, os valores médios observados foram de 22%.

Com relação à rigidez, nota-se após 14 meses que os valores aumentaram consideravelmente para o PVC 1L (31%) e PVC 1T (72%). Para o PEAD ocorre algo estranho com o material no sexto mês de exposição. Sua rigidez diminui aos valores iniciais para ambas as espessuras e, imediatamente no período seguinte, volta a apresentar aumento nos valores da rigidez: 29% para o PEAD 0,8L e 54% para o PEAD 0,8T.

Figura 4.18 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar).

Figura 4.19 – Resultados dos ensaios de tração para o PEAD (0.80, 1.0, 1.5 e 2.5 mm) após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)

Figura 4.20 - Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)

Figura 4.21 - Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para o PEAD (0.8, 1.0, 1.5 e 2.5 mm) após 1, 2, 3, 6 e 14 meses de envelhecimento (Estufa com Circulação de Ar)

Figura 4.22a – Variação das Propriedades de tração após exposição à estufa com circulação de ar

Figura 4.22b – Variação das Propriedades de tração após exposição à estufa com circulação de ar

Figura 4.23 – Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à estufa com circulação de ar

4.2.4 Propriedades de Tração das Amostras Expostas aos Efeitos da Radiação UV e Condensação (45 dias e 6 meses)

As Figuras (4.24) a (4.28) ilustram as variações ocorridas nas propriedades mecânicas após exposição à radiação UV e condensação.

Observa-se que o PVC apresentou pouca variação na deformabilidade no período inicial (45 dias). Após 6 meses, observa-se uma pequena diminuição da deformabilidade para todas as espessuras: 5 a 7% (1,0 mm) e 2 a 4% (2,0 mm). O PEAD de 0,8 e 2,5 mm apresentou diminuição na deformabilidade após 45 dias. A menor espessura apresentou a maior variação (6 e 13%). A variação observada na espessura de 2 mm foi de 5%. Após 6 meses, os valores observados indicam aumento da deformabilidade. O PEAD (1,0 e 1,5 mm) apresentou aumento na deformabilidade após 6 meses. A geomembrana branca apresentou um ligeiro decréscimo de 6% (PEAD 1,0L).

Verifica-se para o PVC que após 6 meses, a variação na rigidez é pequena comparada ao período inicial. Com relação ao PEAD (0,8 e 2,5 mm), as variações após 45 dias e 6 meses foram bem mais expressivas para a menor espessura (0,8 mm).

Figura 4.24 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após exposição à Radiação UV (60°C) e condensação (50°C)

Figura 4.25 – Resultados dos ensaios de tração, rasgo e punção para o PEAD (1.0 e 1.5 mm e 1.0 mm de cor branca) após exposição à Radiação UV (60°C) e condensação (50°C)

Figura 4.26 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para o PVC e PEAD após exposição à Radiação UV (60°C) e condensação (50°C)

Figura 4.27 – Variação das Propriedades de tração após exposição à Radiação UV e Condensação

Figura 4.28 – Variação da Resistência ao Rasgo e ao Puncionamento após exposição à Radiação UV e Condensação

4.2.5. Propriedades de Tração após Compatibilidade em Água a 65° e 85°C e ao Nióbio a 50°C

Os resultados estão apresentados nas Figuras (4.29) e (4.30).

Observa-se para o PVC que a resistência à tração diminui após exposição à água (temperaturas de 65° e 85°C) e ao nióbio (50°C). A deformabilidade apresentou uma pequena diminuição após exposição à água a 65°C. A exposição ao nióbio ocasionou uma diminuição na deformabilidade para ambas as espessuras.

A deformabilidade do PEAD aumentou após a exposição ao nióbio e à água nas temperaturas de 65° e 85°C.

Com relação à rigidez, nota-se que esta diminuiu para as duas espessuras de PVC após exposição à água a 65° e 85°C. A exposição ao nióbio acarretou um pequeno aumento na rigidez do PVC. A 85°C, ocorreu um aumento médio na rigidez de 23% para o PEAD de 0,8 mm e uma diminuição de 28% para a espessura de 2,5 mm na direção longitudinal. Com relação ao nióbio, verifica-se que a rigidez aumentou em média 31% para o PEAD de 0,8 mm e diminuiu cerca de 26% para o PEAD de 2,5 mm. Nesse particular, verifica-se que o comportamento da rigidez ficou caracterizado por aumentos na menor espessura e diminuições na maior espessura.

Figura 4.29 – Resultados dos ensaios de tração para o PVC e PEAD após exposição à água (65°C e 85°C) e ao Nióbio (50°C)

Figura 4.30 – Resultados dos ensaios de Rasgo e ao Puncionamento após exposição à água (65°C e 85°C) e ao Nióbio (50°C)

4.2.6. Análises Térmicas

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos para os ensaios de MFI (PEAD), OIT (PEAD) e TGA (PVC e PEAD). Os ensaios foram realizados nas amostras intactas e envelhecidas nos últimos períodos de análise.

A Tabela (4.1) seguinte apresenta os valores de MFI obtidos para as amostras de PEAD intactas e envelhecidas de acordo com o processo de envelhecimento.

Tabela 4.1 – Valores de MFI para as amostras de PEAD

Processo de Envelhecimento	Amostra de PEAD (mm)	MFI (g/10 min)	Variação Percentual (%) *	Provável ocorrência **
Intactas	0,8	0,1778	-	-
	2,5	0,1460	-	-
Intempérie (2,5 anos)	0,8	0,1500	↓ 15,64	LC
	2,5	0,2302	↑ 57,67	QC
Lixívia (2,5 anos)	0,8	0,2046	↑ 15,07	QC
	2,5	0,2558	↑ 75,20	QC
Estufa Convencional (2,5 anos)	0,8	0,1640	↓ 7,76	LC
	2,5	0,1447	↓ 0,89	LC
Estufa com Circulação de Ar (14 meses)	0,8	0,1544	↓ 13,16	LC
	2,5	0,1484	↑ 1,64	QC
UV (6 meses)	0,8	0,1691	↓ 4,89	LC
	2,5	0,1433	↓ 1,85	LC
Imersão em Nióbio (7 meses)	0,8	0,1717	↓ 3,43	LC
	2,5	0,2229	↑ 52,67	QC

* Variação percentual dos valores de MFI obtidos para as amostras envelhecidas em relação aos valores de MFI das amostras intactas: ↓ (diminuição) ↑ (aumento)

** LC = Ligação cruzada; QC = Quebra (cisão) nas cadeias

As Figuras (4.31) a (4.37) ilustram os resultados obtidos para os ensaios de OIT. Esses resultados estão apresentados na Tabela (4.2).

Tabela 4.2 – Valores de OIT para as amostras de PEAD

Processo de Envelhecimento	Amostra de PEAD (mm)	OIT * (min)	Porcentagem Retida (%) **
Intactas	0,8	12,55	-
	2,5	10,05	-
	1,0 Branca	100,0	-
UV (6 meses)	0,8	6,99	-
	2,5	12,24	-
	1,0 Branca	65,68	65,68
Intempérie (2,5 anos)	0,8	8,11	-
	2,5	11,28	-
Lixívia (2,5 anos)	0,8	3,61	-
	2,5	6,89	-
Estufa Convencional (2,5 anos)	0,8	1,68	-
	2,5	0,96	-
Estufa com Circulação de Ar (14 meses)	0,8	1,88	-
	2,5	0,97	-
Imersão em Nióbio (7 meses)	0,8	9,62	-
	2,5	55,57	-

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

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

Figura 4.31 – Valores de OIT para as amostras intactas de PEAD

Figura 4.32 – Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas em estufa convencional

Figura 4.33 – Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas em estufa com circulação de ar

Figura 4.34 – Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas na intempérie

Figura 4.35 – Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas na lixívia

Figura 4.36 – Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas com o nióbio

Figura 4.37 – Valores de OIT para as amostras de PEAD envelhecidas com radiação UV

As Figuras (4.38) a (4.40) ilustram os resultados obtidos para os ensaios de TGA. Os valores de perda de massa encontram-se nas Tabelas (4.3) e (4.4).

Tabela 4.3 – Valores das perdas de massa no ensaio de TGA (PVC)

Processo de Envelhecimento	PVC (mm)	Parâmetros (%)		
		A	B	C
Intactas	1,0	72,12	16,50	10,31
	2,0	71,67	18,22	09,53
UV (6 meses)	1,0	71,27	18,42	09,81
	2,0	72,36	17,10	09,81
Intempérie (2,5 anos)	1,0	69,86	13,58	15,51
	2,0	69,53	15,55	14,22
Lixívia (2,5 anos)	1,0	71,14	14,78	13,31
	2,0	69,69	16,56	13,20
Estufa Convencional (2,5 anos)	1,0	72,22	15,29	11,87
	2,0	71,90	16,03	11,35
Estufa Circulação de Ar (14 meses)	1,0	69,61	19,26	10,68
	2,0	69,74	19,32	10,92
Imersão em Nióbio (7 meses)	1,0	72,78	18,91	08,83
	2,0	70,78	17,70	10,92

A = Degradação do plastificante e perda de HCl da cadeia do polímero;

B = Polímero residual;

C = Resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e cinzas.

Tabela 4.4 – Valores das perdas de massa no ensaio de TGA (PEAD)

Processo de Envelhecimento	PEAD (mm)	Parâmetros (%)	
		A	B
Intactas	0,8	99,79	0,15
	1,0	98,85	0,59
	1,0 Branca	98,55	1,20
	1,5	99,60	0,30
	2,5	99,41	0,17
UV (6 meses)	0,8	99,49	0,40
	1,0	97,39	2,50
	1,0 Branca	99,48	0,30
	1,5	98,40	1,20
	2,5	99,22	0,60
Intempérie (2,5 anos)	0,8	99,90	0,08
	2,5	98,30	1,12
Lixívia (2,5 anos)	0,8	99,11	0,10
	2,5	97,91	1,72
Estufa Convencional (2,5 anos)	0,8	98,49	1,26
	2,5	98,73	0,86
Estufa Circulação de Ar (14 meses)	0,8	99,31	0,50
	1,0	99,25	0,18
	1,5	98,86	1,10
	2,5	99,00	0,50
Imersão em Nióbio (7 meses)	0,8	97,65	2,00
	2,5	99,94	0,03

A = Degradação do polímero; B = Massa residual (negro de fumo + cinzas)

Figura 4.38 – Análise conjunta dos resultados dos ensaios de TGA para o PEAD (0,8 e 2,5 mm)

Figura 4.39 – Análise conjunta dos resultados dos ensaios de TGA para o PVC (1,0 e 2,0 mm)

Figura 4.40 – Análise conjunta dos resultados dos ensaios de TGA para o PEAD (1,0 mm; 1,0 mm Branca e 1,5 mm)

4.3. Discussão dos Resultados Obtidos

4.3.1. Propriedades Físicas

Verificou-se na análise das propriedades físicas (espessura, gramatura e densidade) das amostras ensaiadas, uma variação mínima destas em função dos períodos de exposição aos diferentes processos de envelhecimento. As variações observadas foram da ordem de 0,5 a 1% em todas as propriedades. A espessura das amostras apresentou um pequeno aumento quando imersa na lixívia, no entanto, essas variações não chegaram a alterar significativamente o valor nominal das espessuras.

4.3.2. Propriedades Mecânicas

a) Intempérie, Lixívia e Estufa Convencional

Observando-se os resultados das Tabelas (A.15) a (A.17) verifica-se que a temperatura média para o período de análise da intempérie foi de 25°C. A umidade relativa do ar oscilou em torno de 66%, a pluviosidade média (chuvas totais) foi de 93 mm mensais e a insolação diária (horas efetivas de sol) foi de 7,9 h/dia com uma radiação global média de 19,2 MJ/m².dia. Esses dados refletem a condição de clima quente com uma intensidade de sol pronunciada ao longo do dia. A pluviosidade foi mais intensa nos meses de novembro a fevereiro.

Com relação à lixívia utilizada, verifica-se que de acordo com os valores apresentados na Tabela (A.14), a lixívia enquadra-se dentro das características de um esgoto doméstico, com um pH praticamente neutro e com temperatura de 29°C. De acordo com

TCHOBANOGLIOUS & BURTON (1991) os valores apresentados pelo esgoto colocam-no numa classificação de concentração que varia de média a forte.

Analisando-se as propriedades de tração, verifica-se que os efeitos mais visíveis para o PVC, com relação à resistência à tração, ocorreram quando este foi exposto à intempérie após 18 meses. No entanto, fica difícil prever-se um comportamento, pois para as espessuras analisadas, houve por vezes diminuição da propriedade numa direção e aumento na outra. Após 30 meses, os valores apresentam-se praticamente inalterados em relação ao período inicial. Com relação à lixívia, a resistência à tração inicialmente apresenta pequenos aumentos, mas parece haver uma tendência de diminuição nesses valores ao longo do tempo. No entanto, a magnitude desses valores fica próxima a 5%. A rigor, não há efeitos significativos da estufa sobre o PVC após 18 meses. As variações observadas ao longo do tempo mostram que a resistência à tração aumentou numa direção e diminuiu na outra. Isso se admitirmos a média dos valores, resulta em uma variação global praticamente inexpressiva da propriedade.

Com relação ao PEAD, nota-se que, apesar das oscilações sofridas pela propriedade nos períodos iniciais (intempérie e lixívia), após o período final de análise parece haver uma convergência dos valores para os valores originais da propriedade. As amostras mais espessas (2,5 mm) apresentaram, ao longo do tempo, aumentos nas variações enquanto que nas amostras de 0,8 mm houve um comportamento de diminuição na propriedade. Em se tratando da estufa, os efeitos foram mais pronunciados quando comparados aos efeitos da lixívia e intempérie, principalmente na maior espessura (2,5 mm). Nota-se que inicialmente há um considerável aumento da resistência à tração para as amostras mais espessas. De um modo

geral, o comportamento das amostras após a exposição ao calor foi de aumento da propriedade no período inicial (6 meses) e relativas diminuições nos períodos seguintes até o período final.

A deformabilidade do PVC é caracterizada nas exposições à intempérie e lixívia por consecutivas diminuições na propriedade. Nota-se que, apesar das oscilações sofridas inicialmente, principalmente no caso da intempérie após 18 e 30 meses, o comportamento do material é caracterizado pela diminuição de sua deformabilidade com uma magnitude de 5 a 10%. No caso da estufa, nota-se um comportamento generalizado para todas as amostras de PVC. Inicialmente, ocorre um pequeno aumento da deformabilidade que vai diminuindo nos períodos seguintes. Após 18 meses, a diminuição da propriedade é caracterizada por valores de 30 a 45%. Apesar de uma relativa redução desses valores no período final, estes ainda continuaram na faixa de 20 a 30% (diminuição).

O comportamento do PEAD em relação à deformabilidade é oposto ao do PVC, ou seja, ao longo do tempo há uma tendência de aumento da deformabilidade em todas as exposições (intempérie, lixívia e estufa). Apesar de se notar que as menores espessuras apresentaram uma pequena diminuição, principalmente na exposição à lixívia, fica evidenciado ao final das análises, que a deformabilidade aumentou para todas as espessuras. Na exposição à lixívia e intempérie, esses aumentos foram mais pronunciados nas amostras de maior espessura (2,5 mm). Com relação à estufa, as amostras seguiram uma mesma tendência de aumento da deformação ao longo do tempo. As variações finais obtidas foram de 15 a 32% de aumento na deformabilidade.

Verifica-se que em relação à rigidez do PVC, considerando-se os efeitos da intempérie, não ocorrem efeitos significativos na propriedade até 12 meses. Após 18 meses, ocorre aumento de 20% em relação às amostras intactas para todas as

espessuras. No entanto, no período final há uma diminuição na rigidez que se aproxima dos valores iniciais do material. Com relação aos efeitos da lixívia, a rigidez do PVC aumenta após 6 e 12 meses e, após esses períodos, começa a decrescer até o período final. Verifica-se que há aumento da rigidez em todas as espessuras e, após 30 meses, a rigidez aumentou de 15 a 30%. No caso da estufa, a rigidez diminui no primeiro período, mas aumenta gradualmente até 18 meses onde atinge valores de até 40% de aumento (PVC 1L). No período final, observa-se diminuição da propriedade a valores muito próximos da rigidez inicial.

Para o PEAD, verifica-se que a rigidez aumenta consideravelmente para as menores espessuras (intempérie e lixívia) até o período de 18 meses onde começa a diminuir. As maiores espessuras (2,5 mm) oscilaram entre aumentos e diminuições na rigidez ao longo do tempo. Após 30 meses essas variações foram de apenas 5%. Com relação à estufa, as amostras de PEAD com menor espessura (0,8 mm) sofreram as maiores variações. Inicialmente, verifica-se aumento da rigidez para todas as amostras. Nos períodos seguintes ocorre diminuição da propriedade até o período final. Apesar de ter ocorrido diminuição da rigidez para o PEAD de 2,5 mm após 6 e 18 meses, nota-se que no período final há uma variação no sentido de aumento da propriedade.

A resistência ao puncionamento aumentou para o PVC (1,0 e 2,0 mm) após as exposições à intempérie, lixívia e estufa. Nota-se que as variações foram mais pronunciadas no PVC de 1,0 mm. Nas exposições à intempérie e lixívia, a resistência ao puncionamento aumenta nos primeiros períodos e depois diminui nos períodos finais. Com relação à estufa, houve após 6 meses, crescimento da variação até o período final de 30% (PVC 1,0 mm) e 12% (PVC 2,0 mm).

O comportamento do PEAD foi caracterizado por pequenas oscilações (em torno de 5%) após exposições à intempérie e

lixívia. Ao final do período, os valores observados indicam diminuição média de 5%. Os efeitos do calor em estufa resultaram em aumento da resistência ao puncionamento para o PEAD nos primeiros períodos (6 a 18 meses). No entanto, após 30 meses, as duas espessuras (0,8 e 2,5 mm) seguiram caminhos opostos, ou seja, a maior espessura manteve seu comportamento (crescimento) enquanto a menor espessura apresentou diminuição da propriedade atingindo um valor muito próximo ao valor da amostra intacta.

Analizando-se os efeitos da intempérie e lixívia sobre o PVC, observa-se que apesar do PVC 1L apresentar alguns valores de diminuição na resistência ao rasgo, no geral, essa propriedade aumentou, em média, 10% para as respectivas exposições. Com relação à estufa, esse mesmo comportamento de aumento da propriedade é verificado até 12 meses. Após 18 meses, a resistência ao rasgo diminui mas volta aos mesmos níveis após 30 meses. No geral, pode-se dizer que somente após 18 meses é que ocorreram efeitos mais significativos sobre essa propriedade após exposição em estufa.

No caso do PEAD, verifica-se que os efeitos da intempérie e lixívia afetaram mais as maiores espessuras. Na exposição à intempérie e lixívia, estas apresentaram aumentos de 40 e 45% após 12 meses. No entanto, no período final de análise, a propriedade decresce atingindo a faixa de 20%. As menores espessuras apresentaram poucas variações ao longo do tempo sendo que, em relação à lixívia, estas foram pouco pronunciadas (em média, 5%). No caso da intempérie, as oscilações atingiram valores de, no máximo, 10% ao final das análises. Os efeitos da estufa sobre o PEAD foram bem pronunciados em comparação aos efeitos sobre o PVC. Observa-se que, inicialmente, ocorre aumento da resistência ao rasgo para todas as espessuras. Novamente aqui, as maiores espessuras apresentaram as maiores variações: 60% (PEAD 2,5L) e 48% (PEAD

2,5T). Nos períodos seguintes ocorre uma gradual diminuição nesses valores. Ao final da análise, observa-se um aumento médio de 40 e 20% na maior e menor espessura, respectivamente.

b) Estufa com Circulação de Ar

Observa-se para o PVC que sua resistência à tração apresenta, ao longo do tempo, pequenas variações no sentido de aumento da propriedade. Ao final do período (14 meses) nota-se uma variação de 5 a 10%. Similarmente, a deformabilidade não apresenta variações significativas. Ocorrem oscilações de aumento e decréscimo. No entanto, o PVC 1T caracteriza-se desde o 1º mês por uma diminuição de 10% na deformabilidade. Esse valor mantém-se constante até o 6º mês. Após 14 meses, a deformabilidade diminui apresentando variações de 5 a 18%.

Com relação à rigidez, observa-se que até os 3 meses iniciais, ocorrem pequenas variações de aumento e diminuição na propriedade. No entanto, após 6 meses, há uma tendência geral de aumento da rigidez. Após 14 meses, verifica-se que as menores espessuras sofreram as maiores variações (30 a 70%). A maior espessura apresentou, desde o início, diminuição da rigidez ao longo do tempo. Mesmo havendo um aumento generalizado da propriedade após 6 meses, as variações ao final de 14 meses mantiveram-se na faixa de 5% (diminuição). Esse fato sugere que, apesar das oscilações dos valores da rigidez, não houve uma variação significativa da propriedade ao longo do tempo. As variações da resistência à tração e deformabilidade indicam que o PVC apresentou uma certa diminuição de sua deformabilidade com algum aumento em sua resistência à tração e rigidez. Esse fato ficou mais evidente nas

menores espessuras que, evidentemente, foram mais afetadas pela ação do calor ao longo do tempo.

Com relação ao PEAD, verifica-se que a resistência à tração apresentou variações mais significativas para o PEAD (2,5 mm) ao longo do tempo. Após 6 e 14 meses, verifica-se que as menores espessuras (0,8; 1,0 e 1,5 mm) apresentaram aumento da propriedade enquanto que nas amostras com maior espessura (2,5 mm), observou-se uma diminuição da mesma.

Apesar de se notar um decréscimo na deformabilidade após 3 meses (principalmente nas espessuras de 0,8 e 2,5 mm), observa-se que essa propriedade aumentou em todas as espessuras ao longo do tempo. Ao final do período ocorreram variações de 20 a 35%. Analisando-se a rigidez do PEAD, constata-se através das variações obtidas que, apesar das oscilações, somente a menor espessura (0,8 mm) aumentou sua rigidez. As demais espessuras ficaram caracterizadas por uma diminuição de sua rigidez ao longo do tempo. Esse fato ficou evidente na espessura de 1,0 mm.

De forma geral, observa-se que a resistência à tração aumentou para as menores espessuras e diminuiu para a espessura de 2,5 mm. A deformabilidade do material aumentou e, excetuando-se a espessura de 0,8 mm que, apresentou aumento em sua rigidez, as demais espessuras apresentaram diminuição no módulo de rigidez. Essas características indicam que o PEAD, de modo geral, tornou-se mais dúctil com relativo ganho de deformabilidade.

A resistência ao puncionamento apresentou maiores variações para o PVC de 1,0 mm. A propriedade aumentou com o tempo atingindo um valor de 25% ao final de 14 meses. Entretanto, a espessura de 2,0 mm sofreu uma variação praticamente inexpressiva ao longo do tempo.

Para o PEAD, ocorrem pequenas oscilações na resistência ao puncionamento no decorrer das análises. As espessuras de 0,8,

1,0 e 2,5 mm apresentaram o mesmo comportamento. A espessura de 1,5 mm apresentou uma variação maior desde o início. No geral, ocorreu aumento da propriedade com uma variação de 5 a 20% em seus valores.

Em termos gerais, verifica-se que a resistência ao puncionamento aumentou para o PVC e o PEAD. Todavia, as maiores espessuras apresentaram menores variações após as análises.

A resistência ao rasgo do PVC apresentou algumas oscilações em seus valores. No entanto, verifica-se que ocorreu um aumento da propriedade ao longo do tempo. Os valores médios após 14 meses oscilaram em torno de 20%.

O PEAD apresentou comportamento semelhante ao PVC, ou seja, aumento da resistência com o tempo. Observa-se que o PEAD de 2,5 mm apresentou, após 2 meses, uma variação mais acentuada na propriedade. Porém, nos períodos seguintes, a variação voltou a igualar-se às demais. Em média, os valores finais ficaram entre 10 e 20%.

c) Radiação UV (60°C) e Condensação (50°C)

Analisando-se as variações sofridas pelo PVC verifica-se que, inicialmente, as duas espessuras analisadas variaram de forma similar sendo que a menor espessura (1,0 mm) foi ligeiramente mais afetada. Nota-se que, após 45 dias, o PVC apresentou diminuição da resistência à tração com aumento de sua deformabilidade e conseqüente diminuição de sua rigidez. Essa diminuição no módulo de elasticidade foi mais expressiva para a espessura de 1,0 mm (35%). Após 6 meses, o comportamento ficou caracterizado apenas por pequenas diminuições na resistência à tração e deformabilidade. A rigidez aumentou 10% para a menor espessura e diminuiu 10%

para a maior espessura. Isso demonstra que após 6 meses, as variações sofridas pelo PVC foram praticamente inexpressivas em relação às amostras intactas. As amostras referentes ao primeiro período apresentaram variações maiores que as amostras avaliadas após 6 meses.

Sob a ação do calor e dos raios UV, o comportamento esperado do PVC seria de um aumento de sua rigidez com conseqüente diminuição de sua deformabilidade. Analisando-se os efeitos do primeiro período, verifica-se que o comportamento foi totalmente inverso, ou seja, houve diminuição de sua rigidez e aumento de sua deformabilidade. Após 6 meses, o comportamento observado está mais coerente com os efeitos provocados pela ação UV e pelo processo de condensação. Ressalta-se que o aumento da deformabilidade no primeiro período não foi tão expressivo: apenas 10% para o PVC 1L. A maior variação ocorreu para o módulo de elasticidade na menor espessura. Isso, sem dúvida, pode refletir as dificuldades de obtenção desse parâmetro podendo, de certa forma, “mascarar” alguns resultados.

Com relação ao PEAD, verifica-se que após 45 dias seu comportamento é caracterizado por poucas variações nas resistências à tração e na deformabilidade. A rigidez variou bruscamente apenas para a menor espessura (0,8 mm) apresentando valores de até 60% de aumento na propriedade. Dessa forma, constata-se que o material apresentou aumento de rigidez com conseqüente diminuição de deformabilidade apenas para a menor espessura após 45 dias de análise. A maior espessura praticamente não alterou suas propriedades. Após 6 meses, verifica-se que a menor espessura não varia sua resistência à tração mas apresenta aumento de rigidez (30 e 50%) e de deformabilidade (27%) na direção longitudinal. Quando ocorre um aumento pronunciado da rigidez do material, este deve vir acompanhado de mudanças significativas na resistência à tração ou

na deformabilidade. Se a rigidez varia, a resistência à tração deve variar também assim como a deformabilidade. Esses aumentos na rigidez observados para o PEAD de 0,8 mm podem apenas refletir as incertezas de determinação da propriedade. Em outras palavras, as variações ocorridas para o material após 6 meses não foram tão pronunciadas uma vez que a resistência à tração e a deformabilidade não variaram significativamente. Para a maior espessura, o comportamento é caracterizado por pequenos aumentos na resistência à tração e na deformabilidade. A variação da rigidez foi inexpressiva e, considerando-se as incertezas desse parâmetro, pode-se inferir que o material tornou-se um pouco mais dúctil em relação às amostras intactas.

Analisando-se as geomembranas de PEAD de 1,0 e 1,5 mm, nota-se um comportamento similar para estas após 6 meses de análises. Verificam-se pequenos aumentos na resistência à tração e na deformabilidade para ambas as espessuras. As variações ocorridas no módulo de elasticidade também foram pouco significativas indicando que o material apresentou pequenos aumentos na ductibilidade após o período de 6 meses.

A geomembrana branca texturizada de 1,0 mm apresentou pequenas variações em seu comportamento. Sua deformabilidade e rigidez praticamente permaneceram inalteradas, o que demonstra, após o período específico de análise, uma certa eficiência da proteção contra a ação dos raios UV.

Com relação à resistência ao puncionamento, nota-se que as variações ocorridas para o PVC e o PEAD foram pouco pronunciadas após 45 dias e após 6 meses. A maior variação ocorreu para o PVC de 2,0 mm e para o PEAD de 1,5 mm após 6 meses de exposição: diminuição de 9% (PVC 2,0 mm) e aumento de 15% (PEAD 1,5 mm).

Avaliando-se a resistência ao rasgo para o PVC, nota-se que ocorreram diminuições mais acentuadas para o PVC de 1,0 mm após 45 dias. No entanto, após 6 meses essa variação passa a ser de aumento na propriedade. Fica difícil argumentar-se sobre a oscilação dos valores da propriedade. No entanto, pode-se conceber, como exposto por SUITS & HSUAN (2002), que em alguns casos o efeito do calor e não da ação UV pode alterar a propriedade. Dessa forma, pode ser perfeitamente aceitável que as menores espessuras sofreram mais intensamente a ação da incubação a 60°C. Some-se a isso, a perda de voláteis e plastificantes que pode ocorrer nas geomembranas de PVC.

As geomembranas de PEAD foram pouco afetadas após 45 dias. Após 6 meses, as variações ocorridas foram de aumento da propriedade para as espessuras de 1,0, 1,5 e 2,5 mm. A geomembrana branca texturizada de 1,0 mm também apresentou aumento de 20% na resistência ao rasgo.

d) Compatibilidade em Água a 65° e 85°C e ao Nióbio a 50°C

Analisando-se os efeitos de imersão a 65°C sobre o PVC, verifica-se uma diminuição das propriedades de tração, ou seja, as duas espessuras analisadas apresentaram diminuição em suas propriedades. Essa diminuição foi mais pronunciada na espessura de 2,0 mm. Nota-se que o material diminuiu sua deformabilidade com conseqüente diminuição de sua resistência à tração. Houve também diminuição da rigidez, no entanto, o valor mais pronunciado ocorreu para o PVC 2T (20%).

Ressalta-se que as diminuições ocorridas nas propriedades a 65°C foram inexpressivas. A rigidez diminuiu para todas as espessuras (maior variação para o PVC 2T). Isso sugere, inicialmente, que o efeito do aquecimento provoca um certo

decréscimo da rigidez e da deformabilidade. No entanto, como as variações ocorridas não são expressivas, pode-se inferir que apesar do aquecimento provocar a saída de voláteis e plastificantes do material (mesmo em pequenas quantidades), as variações ocorridas a essa temperatura não fornecem uma idéia precisa do comportamento das geomembranas. Em outras palavras, apesar de ocorrer um certo decréscimo das propriedades, esses valores não refletem um comportamento do material a essa temperatura no período analisado. Diante disso, o aquecimento a 85°C pode trazer maiores esclarecimentos sobre esse comportamento, senão vejamos: a 85°C, o PVC apresenta menores variações na resistência à tração e na rigidez do que a 65°C. Somente a deformabilidade a 85°C é que se apresentou um pouco abaixo daquela a 65°C. Esses fatores permitem inferir que mesmo a 85°C, as variações ocorridas para as geomembranas de PVC não fornecem uma tendência de comportamento do material. Ademais, o efeito do aquecimento com um líquido não agressivo, para o caso específico da água, demonstrou que as geomembranas de PVC mantiveram suas propriedades de tração praticamente inalteradas.

Com relação ao PEAD, verifica-se que os efeitos do aquecimento a 65°C resultaram em condições diferenciadas para as espessuras de 0,8 e 2,5 mm. Observa-se que há um aumento de deformabilidade para ambas as espessuras. No entanto, a menor espessura não apresentou variações na resistência à tração e na rigidez. A maior espessura apresentou uma diminuição média de 20% em sua rigidez. Isso demonstra que houve um amolecimento do material a essa temperatura e que a maior espessura foi a mais afetada. Analisando-se o PEAD a 85°C, observa-se que a espessura de 0,8 mm apresentou aumento em sua deformabilidade e em sua rigidez sem alterar sua resistência à tração. Isso, em termos práticos, significa que o material teria se tornado mais dúctil e rígido ao

mesmo tempo. No entanto, é preciso ter-se em mente que os valores do módulo de rigidez inicial são sempre susceptíveis de erros em sua determinação. Analisando-se a espessura de 2,5 mm, percebe-se que há um aumento de sua deformabilidade com conseqüente diminuição de sua rigidez. Novamente aqui, a maior espessura apresentou as maiores variações com uma tendência de aumento de sua ductibilidade.

No geral, observa-se que há um aumento generalizado da deformabilidade para o PEAD em contato com a água a 65°C e 85°C. Como as variações da rigidez apresentaram-se contraditórias para as espessuras analisadas, poder-se-ia num primeiro instante admitir-se a inexistência de um comportamento para o material. Entretanto, se considerarmos as imprecisões quanto à determinação do módulo de elasticidade, verifica-se que há uma tendência de diminuição dessa propriedade analisando-se as maiores espessuras. Dessa forma, o comportamento observado ficou caracterizado pelo amolecimento do material.

Analisando-se os efeitos do nióbio sobre o PVC, verifica-se que ocorreram pequenas diminuições da deformabilidade e da resistência à tração. A rigidez apresentou pequenos aumentos para as duas espessuras. No geral, as variações ocorridas indicaram um pequeno decréscimo da deformabilidade com conseqüente aumento da rigidez, ou seja, o material tornou-se levemente mais rígido.

Em se tratando do PEAD, verifica-se que as oscilações ocorridas para a resistência à tração foram insignificantes e que ocorreram pequenos aumentos na deformabilidade para as espessuras analisadas. Com relação à rigidez, novamente o fenômeno ocorrido com a água a 65°C e 85°C volta a ocorrer. A menor espessura (0,8 mm) apresentou aumentos em sua rigidez de 22 e 40% enquanto que a espessura de 2,5 mm ficou caracterizada por diminuições de 15 e 30%. Isso evidencia que a menor espessura se

tornou mais rígida com pequenos aumentos (5 e 10%) em sua deformabilidade e conseqüente aumento de sua resistência à tração. Por outro lado, tem-se um ganho de ductibilidade e de deformabilidade para a maior espessura. Para explicar esse fenômeno, duas hipóteses podem ser abordadas. A primeira que se refere à imprecisão da determinação do módulo de elasticidade abordada anteriormente e, a segunda, que diz respeito à degradação não uniforme das geomembranas quando em contato com resíduos sólidos e/ou líquidos. Essa degradação decorre da possibilidade de ocorrer sedimentação do produto quando este apresentar duas fases numa solução. Em se tratando do resíduo do nióbio, esse fato pôde ser notado ao longo dos ensaios onde se percebia nitidamente a deposição de um resíduo mais pesado no fundo dos recipientes. Dessa forma, pode ocorrer que, na confecção dos corpos de prova para os ensaios, estes estejam caracterizados por diferentes níveis de degradação, a depender da região da geomembrana de onde foram retirados. Numa ou noutra abordagem dessas hipóteses, ou ainda as duas em conjunto, ter-se-ia uma explicação aceitável do que possa ter ocorrido.

A resistência ao puncionamento para o PVC quando em contato com a água a 65°C praticamente não se alterou para o PVC de 1,0 mm, entretanto, uma diminuição de 21% ocorreu para a espessura de 2,0 mm. O PEAD oscilou entre uma pequena diminuição (8%) para a espessura de 0,8 mm e um pequeno aumento (7%) para a espessura de 2,5 mm. Com o aumento da temperatura (85°C), a resistência ao puncionamento aumentou para as duas espessuras de PVC atingindo um valor de 26% (PVC 1,0 mm). Para o PEAD, as variações foram de cerca de 5% (aumento na propriedade).

Essas variações demonstram que a resistência ao puncionamento não apresentou uma tendência nítida de comportamento para o PVC. Para o PEAD, as variações ocorridas

entre uma e outra temperatura não foram significativas (em torno de 5%).

Os efeitos do nióbio sobre o PVC afetaram mais a espessura de 2,0 mm (diminuição de 21%). Para o PEAD, a resistência ao puncionamento praticamente não se alterou.

A resistência ao rasgo para o PVC em contato com a água a 65 e 85°C apresentou pequenos aumentos (8%) na menor espessura. A espessura de 2,0 mm foi mais afetada pela temperatura de 85°C que ocasionou um aumento de 12% na propriedade.

Com relação ao PEAD, os efeitos da temperatura provocaram pequenas variações de aumento nas espessuras de 0,8 mm. No entanto, as maiores espessuras aumentaram, em média, 25% o valor da resistência ao rasgo.

Os efeitos do nióbio sobre o PVC provocaram aumentos na resistência ao rasgo em todas as espessuras. No entanto, esses valores não foram tão acentuados. Em média, a propriedade aumentou 7%. Para o PEAD, a resistência ao rasgo também aumentou em contato com o nióbio. As maiores variações ocorreram para a espessura de 2,5 mm que aumentou a propriedade em 13%.

Fica evidente que os maiores aumentos na resistência ao rasgo ocorreram nas geomembranas de PEAD com maior espessura após a exposição à água e ao nióbio.

e) Comparação entre os Resultados Obtidos para a Estufa Convencional *versus* a Estufa com Circulação de Ar

Analisando-se os efeitos sobre o PVC, nota-se que as variações sofridas pelas propriedades mecânicas foram bastante semelhantes.

Na exposição ao calor em estufa convencional houve uma significativa diminuição da deformabilidade do material ao longo do tempo com conseqüente aumento de sua rigidez (principalmente na menor espessura). No caso da estufa com circulação de ar, os efeitos foram semelhantes. Houve decréscimo da deformabilidade ao longo do tempo e aumento acentuado da rigidez para as menores espessuras. Apesar das oscilações dos valores da rigidez, não houve uma variação significativa da propriedade nos períodos de análise.

As resistências ao puncionamento e ao rasgo aumentaram para o PVC (1,0 e 2,0 mm) após exposição à estufa convencional. No caso da Estufa com circulação de ar, a resistência ao puncionamento apresentou maiores variações para o PVC de 1,0 mm. De forma geral, as maiores espessuras apresentaram menores variações após as análises para a exposição com fluxo de ar. A resistência ao rasgo ficou caracterizada por aumento da propriedade.

No caso do PEAD, os efeitos da estufa convencional resultaram em oscilações da resistência à tração com uma mesma tendência de aumento da deformação ao longo do tempo para as amostras. As amostras de PEAD com menor espessura (0,8 mm) sofreram as maiores variações na rigidez. Inicialmente, verifica-se aumento da rigidez para todas as amostras. Nos períodos seguintes ocorre diminuição da propriedade até o período final, exceto para o PEAD de 2,5 mm.

Na estufa com circulação de ar, verifica-se que também houve aumento da deformabilidade para o PEAD ao longo do tempo. De forma geral, observa-se que a resistência à tração aumentou para as menores espessuras e diminuiu para a espessura de 2,5 mm. A deformabilidade do material aumentou e, excetuando-se a espessura de 0,8 mm que apresentou aumento em sua rigidez, as demais espessuras apresentaram diminuição no módulo de rigidez. Essas

características indicam que o PEAD, de modo geral, tornou-se mais dúctil com relativo ganho de deformabilidade.

Os efeitos do calor em estufa convencional resultaram em aumento da resistência ao puncionamento para o PEAD nos primeiros períodos (6 a 18 meses). No entanto, após 30 meses, as duas espessuras (0,8 e 2,5 mm) seguiram caminhos opostos, ou seja, a maior espessura manteve seu comportamento (crescimento) enquanto a menor espessura apresentou diminuição da propriedade atingindo um valor muito próximo ao da amostra intacta. Para a estufa com circulação de ar ocorreram aumentos da propriedade com uma variação de 5 a 20% em seus valores.

Com relação à resistência ao rasgo, nota-se que os efeitos da estufa convencional sobre o PEAD foram bem pronunciados em comparação aos efeitos sobre o PVC. Ao final da análise, observa-se um aumento médio de 40 e 20% na maior e menor espessura, respectivamente. Para o caso da estufa com circulação de ar, ocorreu aumento da resistência com o tempo, sendo que os valores finais ficaram entre 10 e 20%.

Independente do tipo de estufa utilizada, as variações da resistência à tração e deformabilidade indicam que o PVC apresentou uma certa diminuição de sua deformabilidade com algum aumento em sua resistência à tração e rigidez. Esse fato ficou mais evidente nas menores espessuras que foram mais afetadas pela ação do calor ao longo do tempo. No caso do PEAD, a tendência de comportamento observada é de aumento de sua deformabilidade com conseqüente diminuição de sua rigidez nos dois tipos de análise (estufa convencional e com circulação de ar).

Com relação à resistência ao puncionamento e ao rasgo, verifica-se que em ambos os casos, os valores da resistência ao puncionamento e ao rasgo aumentaram para as amostras de PVC e PEAD.

4.3.3. Propriedades Térmicas

a) Índice de Fluidez (MFI)

Analisando-se os valores obtidos do índice de fluidez (MFI), observa-se que os valores obtidos para as amostras intactas encontram-se abaixo da faixa usual que, de acordo com SHARMA & LEWIS (1994) é de 0,2 a 1,0 g/10 min. Esses baixos valores do MFI resultam em um alto valor de peso molecular. Isso se evidencia pelo valor da densidade obtida para as geomembranas, ou seja, quanto maior o valor da densidade, maior será o valor do peso molecular e, conseqüentemente, isso resultará num baixo valor do MFI.

Normalmente, os valores da densidade das resinas de PEAD encontram-se na faixa de 0,932 a 0,940. Com a adição de negro de fumo (2-3%) e antioxidante (0,5%), a formulação final do produto irá apresentar uma densidade de 0,941 a 0,950 (HSUAN & KOERNER, 1998). De acordo com a relação entre a massa específica da resina e do produto proposta por GIROUD (1995), pode-se estimar os valores de negro de fumo utilizados nas geomembranas de PEAD. A relação é expressa por:

$$\rho_{\text{produto}} = \rho_{\text{resina}} + 0,0044C \quad (4.1)$$

onde C = quantidade de negro de fumo (%)

Como $\rho_{\text{produto}} = 0,95 \text{ g/cm}^3$ (valor obtido) então,

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

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

Isso fornece um valor médio da quantidade de negro de fumo de aproximadamente 3,19%. Verifica-se, portanto, que o valor estimado da percentagem de negro de fumo pela equação de GIROUD (1995) está dentro dos limites normalmente utilizados na prática (ver por exemplo, SHARMA & LEWIS, 1994).

Como os valores obtidos do MFI encontram-se abaixo dos valores encontrados na literatura poder-se-ia supor inicialmente que o produto encontra-se fora de sua especificação. No entanto, de acordo com HAGE (2003) é difícil de se estabelecer uma faixa de valores para o índice de fluidez sem o prévio conhecimento das condições de extrusão do material durante o seu processamento. De acordo com o pesquisador, esses valores do MFI encontram-se dentro de uma faixa normal de extrusão. Ademais, os valores obtidos da densidade do material (0,95) assim como de sua percentagem de negro de fumo (3,19%) estão em concordância com as especificações do mesmo. Ressalta-se, porém, que se o fabricante estipula um valor do MFI e este não corresponde ao valor do material entregue em obra, pode-se perfeitamente rejeitar o produto em virtude de provável alteração na qualidade da resina que será detectada pela alteração no valor do índice de fluidez.

As variações ocorridas no valor do MFI indicam ocorrência de degradação oxidativa quer seja por ocorrência de ligação cruzada ou por quebra de cadeias (cisão) do polímero. Se o valor do MFI decresce, ocorre aumento do peso molecular (PM) e surgem ligações cruzadas¹. A ocorrência de ligações cruzadas resulta da quebra dos vínculos das cadeias que passam a se interligarem de

---

¹ As ligações cruzadas são cadeias moleculares contendo alta densidade de ligações químicas primárias entre as cadeias diferentes. São características dos termorrígidos. Os termoplásticos são polímeros com cadeias lineares ou ramificadas, sem ligações cruzadas, isto é, entre as cadeias poliméricas diferentes só existem interações intermoleculares secundárias, reversíveis com a temperatura. No entanto, quando ocorre degradação, as ligações cruzadas que surgem diferem dessas que são impostas aos polímeros na fase de processamento. Surgem como efeito da degradação superficial ocorrida.

forma cruzada e, apesar de resultar em melhoria parcial de algumas propriedades, altera as propriedades mecânicas do material tornando-o mais rígido e diminuindo sua deformabilidade. Se o inverso ocorre, ou seja, aumento no valor do MFI, irá ocorrer decréscimo do PM e cisão nas cadeias poliméricas. A cisão nas cadeias poliméricas torna o polímero mais quebradiço e susceptível ao fenômeno do *stress-cracking* (fissuramento sob tensão).

Após os respectivos períodos de envelhecimento, verifica-se que ocorreram aumentos e decréscimos nos valores do MFI em função do tipo de exposição que o material sofreu.

Os decréscimos nos valores do MFI ocorreram nas geomembranas de 0,8 mm (estufa com circulação de ar, exposição à intempérie e exposição ao nióbio) e nas geomembranas de 0,8 e 2,5 mm (exposição à estufa convencional e exposição UV). A ocorrência provável é de surgimento de ligações cruzadas (degradação em nível superficial). No entanto, verifica-se que as variações ocorridas nas geomembranas de 2,5 mm foram praticamente inexpressivas: 0,89% (estufa convencional) e 1,85% (UV). O maior decréscimo observado ocorreu para o PEAD (2,5 mm) após exposição à intempérie (15,64%). As geomembranas de menor espessura foram mais afetadas principalmente nas exposições em estufas e na exposição à intempérie. O comportamento das propriedades mecânicas nessas exposições (aumento de rigidez e diminuição na deformabilidade) confirma o aparecimento de ligações cruzadas no material evidenciando a degradação oxidativa.

Os acréscimos verificados nos valores do MFI ocorreram nas geomembranas de PEAD de 2,5 mm após exposição à intempérie, estufa com circulação de ar e exposição à lixívia e ao nióbio. Somente a espessura de 0,8 mm exposta à lixívia apresentou aumento no valor do MFI. A geomembrana de 2,5 mm (estufa com circulação de ar) apresentou um aumento desprezível de 1,85%. No entanto, as demais

amostras apresentaram valores extremamente elevados. Nota-se que os valores apresentados pelo PEAD de 2,5 mm após exposição à intempérie, lixívia e nióbio são extremamente elevados indicando provável ocorrência de cisão nas cadeias poliméricas e susceptibilidade ao fenômeno do *stress-cracking*.

Dessa forma, verifica-se que através dos valores do índice de fluidez, as geomembranas com espessura de 2,5 mm sofreram processo degradativo mais acentuado após exposição à intempérie, lixívia e ao nióbio. A espessura de 0,8 mm também apresentou cisão nas cadeias após exposição à lixívia.

Em termos práticos, se o processo de cisão prossegue, as regiões quebradiças irão aumentando progressivamente de tal forma que ocorra fissuramento nas regiões solicitadas da geomembrana. ROWE & SANGAM (2002) ressaltam que uma vez que o fissuramento provoque aumento do fluxo através da geomembrana, esta pode ser considerada como uma geomembrana que atingiu o fim de sua vida útil (*“service life”*).

b) Ensaios de DSC com medida de OIT (Tempo de Oxidação)

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

Analisando-se os resultados obtidos para as amostras ensaiadas de acordo com o Std-OIT, verifica-se que as amostras de 0,8 e 2,5 mm apresentaram valores de OIT extremamente baixos. A geomembrana branca texturizada foi a única a atingir o valor mínimo de 100 minutos. Após os respectivos processos de envelhecimento, os valores de OIT obtidos apresentaram diminuição em relação aos valores das amostras intactas.

As amostras expostas ao calor na estufa convencional e com circulação de ar apresentaram valores de OIT próximos a zero. Esses resultados já eram esperados uma vez que as condições de ensaio foram bastante severas com tempos de incubação extremamente longos.

As geomembranas com menor espessura apresentaram os menores valores de OIT após exposição à intempérie, lixívia, nióbio e radiação UV.

A geomembrana de 2,5 mm após exposição ao nióbio apresentou um valor de OIT de 55,57 minutos. Esse valor é bem superior ao da amostra virgem (10,05 minutos). Analisando-se o valor do MFI para essa condição, verifica-se que houve um aumento em seu valor de 52,67%. Esse aumento evidencia um processo degradativo de oxidação com conseqüente cisão nas cadeias poliméricas. Em outras palavras, o valor final de OIT deveria ser menor que o da amostra intacta. Acredita-se que deve ter ocorrido alguma imprecisão nessa determinação face aos baixos valores de OIT das amostras intactas. Outro fator que vem como suporte dessa afirmativa é a variação dos valores de MFI apresentados pelas geomembranas de 2,5 mm expostas à intempérie e à lixívia. Essas amostras apresentaram aumento nos valores do MFI e redução nos valores de OIT. O mesmo deveria ocorrer para a amostra de 2,5 mm exposta ao nióbio.

As amostras expostas ao UV apresentaram baixos valores de OIT. No entanto, a geomembrana branca texturizada apresentou um valor de 65,68 minutos. Mesmo que o critério do método GM13 não recomende o ensaio Std-OIT para essa condição, verifica-se que a geomembrana branca apresentou um comportamento bastante satisfatório tanto para a amostra virgem como para a amostra exposta. Sua percentagem retida de OIT (Std-OIT) foi de 65,68%.

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

Como exposto anteriormente, o consumo de antioxidantes ocorre por processo de volatilização e de extração. No caso específico da pesquisa, verificou-se que, provavelmente, a perda de antioxidantes ocorreu por processo de volatilização nas amostras expostas ao calor (UV, estufas e intempérie). O fenômeno de extração e volatilização ocorreu nas amostras imersas na lixívia e no nióbio. Novamente contrastando-se os valores do MFI e OIT, verifica-se que os maiores aumentos nos valores do MFI ocorreram nas amostras expostas à lixívia, nióbio e intempérie. Dessa forma, há evidência de que nas amostras imersas o consumo de antioxidantes ocorreu mais rapidamente do que nos outros casos. Esse fato fica mais evidente para a exposição ao nióbio que teve uma duração de apenas sete meses.

Com relação aos valores obtidos no ensaio de OIT, deve-se levar em conta, como exposto no capítulo 2, que o ensaio Std-OIT a 200°C com pressão de 35 kPa, pode conduzir a resultados

equivocados principalmente para antioxidantes do tipo HALS². Como não há informação precisa a respeito do pacote de antioxidantes das geomembranas ensaiadas, acredita-se que estas sejam do tipo HALS em função dos valores de OIT obtidos. O ensaio de OIT com alta pressão (3500 kPa e 150°C) certamente é mais eficaz para detectar os diferentes tipos de antioxidantes, além do mais, trabalha com temperaturas mais próximas à temperaturas de serviço das geomembranas.

c) Ensaios de TGA (Perda de Massa)

Analisando-se as composições do PVC de 1,0 e 2,0 mm, verifica-se que, em média, a quantidade de plastificantes, aditivos e cargas nas geomembranas está compreendida na faixa de 70%. Esse valor é relativamente alto se comparado aos valores da literatura. KOERNER (1998) explicita que a formulação aproximada para o PVC é de 30% (plastificantes), 25% (cargas), 5-10% (negro de fumo), 2-3% (aditivos) e 35% (resina).

Os materiais analisados apresentam uma quantidade menor de resina ($\cong 17\%$). Como uma das vantagens das geomembranas de PVC é permitir que se altere sua formulação, acredita-se que o material analisado tinha finalidades específicas de utilização na prática. A quantidade de negro de fumo e aditivos está de acordo com os valores correntes da literatura.

Comparando-se as curvas de perda de massa das amostras virgens *versus* amostras degradadas, nota-se uma proximidade muito grande destas. As maiores reduções de

---

² A eficiência de antioxidantes depende da temperatura. Alguns antioxidantes que oferecem proteção efetiva à temperatura ambiente podem não ser efetivos nas temperaturas elevadas dos ensaios de OIT.

plastificantes ocorreram para as amostras que foram expostas à intempérie e estufa com circulação de ar. O maior valor observado foi de 3,48% (PVC 1,0 mm – estufa com circulação de ar). Para a espessura de 2,0 mm exposta à lixívia, houve também uma perda de 2,76%. Para o caso da intempérie, lixívia e estufa com circulação de ar, essa perda de plastificantes pode ter contribuído para a diminuição de sua deformabilidade com conseqüente aumento de sua rigidez após o período de análise (2,5 anos).

Observando-se as perdas de massa ocorridas para as amostras de PEAD, verifica-se que as amostras intactas e envelhecidas apresentaram perdas de massa muito semelhantes. A maior variação após os processos de exposição ocorreu para o PEAD 0,8 mm exposto ao nióbio (2,1%).

Analisando-se as porcentagens de negro de fumo e cinzas contidas nas amostras expostas, verifica-se que esses valores são extremamente baixos se comparados à porcentagem de 2-3% que deveria estar presente nas amostras. Esse processo de obtenção da massa residual (cinzas + negro de fumo) foi realizado à temperatura de 700°C). No entanto, para a determinação precisa da quantidade de negro de fumo, deve-se introduzir oxigênio na amostra a 550°C e verificar a quantidade de material oxidado. Como o ensaio foi realizado somente com nitrogênio, acredita-se que possa haver uma certa incoerência nesses valores.

Observando-se as curvas obtidas para o PEAD de 0,8 mm, nota-se que as amostras expostas começam o processo de perda de massa a temperaturas superiores àquela da amostra intacta. A temperatura para o início do processo de perda de massa da amostra intacta foi de aproximadamente 420°C enquanto que para as amostras expostas esse valor variou de 440°C a 480°C. De acordo com HALSE ET AL. (1991) o PEAD começa a perder massa a 470°C.

Os resultados mostram que, apesar da pequena diferença apresentada pela amostra intacta nesse valor de temperatura, as amostras envelhecidas apresentaram temperaturas próximas a 470°C. Pode-se afirmar que não houve variações pronunciadas nas curvas de perda de massa para o PEAD de 0,8 mm. Em se tratando do PEAD 2,5 mm, esse fenômeno também é visível e percebe-se que as curvas apresentam valores muito próximos em relação à temperatura que ocasiona o início de suas respectivas perdas de massa.

De modo geral, observa-se que as curvas obtidas no ensaio de TGA para o PEAD e PVC não forneceram uma quantificação precisa dos níveis de degradação ocorridos. As variações ocorridas nas propriedades mecânicas do PVC não podem ser justificadas unicamente pela perda de plastificantes. Essas perdas foram pequenas e podem apenas atuar como parcelas adicionais de outros agentes degradantes e/ou efeitos sinérgicos. Os valores de MFI e OIT demonstraram, por exemplo, a ocorrência de degradação oxidativa nas geomembranas de PEAD. O ensaio de valor K seria bastante útil para elucidar a questão de degradação oxidativa nas geomembranas de PVC.

5 – CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e das comparações entre as amostras intactas e submetidas aos diferentes processos de envelhecimento pode-se constatar que, de certa forma, as propriedades analisadas sofreram algumas alterações. Evidente que algumas propriedades variaram de forma pouco pronunciada como é o caso das propriedades físicas. Os demais processos avaliados mostraram que apesar das oscilações dos valores obtidos, as propriedades mecânicas variaram conforme o processo de envelhecimento empregado.

De forma geral, algumas constatações ficaram evidentes, a saber:

- Após exposição à intempérie, lixívia e estufa convencional, ocorreu diminuição de deformabilidade para o PVC e aumento para o PEAD. A rigidez aumentou para o PVC enquanto que para o PEAD, ocorreram oscilações principalmente nas maiores espessuras que apresentaram tendência de diminuição da propriedade ao final do período de análise;
- As variações ocorridas na estufa convencional e na estufa com circulação de ar foram bastante similares para o PVC e PEAD, ou seja, o PVC apresentou uma certa diminuição de sua deformabilidade com aumentos em sua resistência à tração e rigidez (principalmente nas menores espessuras). No caso do PEAD, a tendência de comportamento observada foi de aumento de sua

deformabilidade e conseqüente diminuição de sua rigidez nos dois tipos de exposição ao calor;

- 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. A geomembrana branca manteve suas propriedades praticamente inalteradas demonstrando, após o período específico de análise, sua eficiência na proteção contra a ação dos raios UV;
- Na exposição à água a 65°C e 85°C, o efeito do aquecimento não afetou as propriedades de tração das geomembranas de PVC. Para o PEAD ocorreu um aumento generalizado da deformabilidade caracterizando um amolecimento do material (relaxamento).
- Após exposição ao nióbio, as variações ocorridas para o PVC indicaram um pequeno decréscimo da deformabilidade com conseqüente aumento da rigidez, ou seja, o material tornou-se levemente mais rígido. Para o PEAD, as oscilações ocorridas para a resistência à tração foram insignificantes ocorrendo pequenos aumentos na deformabilidade.

Verificou-se que as análises térmicas realizadas nas geomembranas foram de suma importância para a identificação da degradação ocorrida. No entanto, as análises de perda de massa (TGA) não se apresentaram como indicadores precisos de degradação do material. Para as geomembranas de PEAD, os ensaios de MFI e de OIT conseguiram retratar com mais eficiência os níveis ocorridos de degradação. Infelizmente, para a avaliação das geomembranas de PVC, não foram realizados ensaios específicos como o ensaio do valor

K. Em tese, esse ensaio pode fornecer maiores informações acerca das variações de degradação oxidativa do PVC.

As variações nas propriedades mecânicas das geomembranas podem não indicar degradação significativa das propriedades e até podem estar dentro de limites aceitáveis como exposto por KOERNER (1998). No entanto, através das análises térmicas, principalmente os ensaios de MFI e OIT, constatou-se que a degradação do material já começou a ocorrer principiando situações mais críticas de desempenho da geomembrana em obra. Ressalta-se também que, pela eficiência demonstrada por esses ensaios na identificação dos processos degradativos, as análises térmicas devem ser utilizadas em qualquer tipo de avaliação da qualidade e durabilidade das geomembranas. No presente trabalho, estas análises mostraram-se mais eficientes do que as avaliações das propriedades mecânicas das geomembranas.

Em suma, pode-se afirmar que os processos contribuíram para a análise do comportamento dos materiais sob efeitos de degradação diferenciados, no entanto, não há a menor possibilidade de se estender esses resultados para possíveis previsões em situações de uso corriqueiro em obras. Isso porque em situações de campo existe uma complexidade muito maior de solicitações e efeitos sinérgicos atuantes sobre os materiais.

Finalmente, ressalta-se que os resultados obtidos forneceram informações importantes para esse estudo complexo e extremamente inovador que é a análise da degradação de materiais poliméricos empregados em obras geotécnicas.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D471 (2000) *Test Method for Rubber Property-effect of Liquids.*
- ASTM D543 (2001) *Standard Practice for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents.*
- ASTM D573 (1981) *Standard Test Method for Rubber – Deterioration in an Air Oven.*
- ASTM D638 (1984) *Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics.*
- ASTM D751 (1979) *Standard Methods of Testing Coated Fabrics.*
- ASTM D792 (1979) *Standard Test Methods for Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement.*
- ASTM D794 (1993) *Practice for Determining Permanent Effect of Heat on Plastics.*
- ASTM D882 (19983) *Standard Test Methods Tensile Properties of Thin Plastics Sheeting.*
- ASTM D1004 (1981) *Standard Test Method for Initial Tead for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting.*
- ASTM D1042 (1993) *Standard Test Methods for Linear Dimensional Changes of Plastics under Accelerated Service Conditions.*
- ASTM D1149 (1981) *Standard Test Method for Rubber Deterioration – Surface Ozone Cracking in a Clamber (Flat Specimens).*
- ASTM D1204 (1984) *Standard Test Method for Liner Dimensional Changes of Non – Thermoplastic Sheeting or Film at Elevated Temperature.*
- ASTM D1238 (2001) *Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer Endurance of the Geomembrane Under Examination.*

ASTM D1243 (2000) *Ensaio para Viscosidade em Solução Diluída de Polímeros de Cloreto de Vinila.*

ASTM D1593 (1981) *Standard Specification for Non-rigid Vinychloride Plastic Sheeting.*

ASTM D1435 (1994) *Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics.*

ASTM D1603 (1994) *Standard Test Methods for Carbon Black in Olefin Plastics.*

ASTM D1693 (1976) *Standard Test Method for Carbon Black in Olefin Plastics.*

ASTM D1790 (1983) *Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastic Sheeting by Impact.*

ASTM D1938 (1978) *Standard Test Method for Tear Propagation Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by a Single Tear Method.*

ASTM D2228 (1983) *Standard Test Method for Rubber Property – Abrasion Resistance.*

ASTM D2240 (1986) *Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness.*

ASTM D2552 (1980) *Standard Test Method for Environmental Stress Rupture of Type III Polyethylenes under Constant Tensile Load.*

ASTM D2259 (1996) *Standard Test Method for Shrinkage of Yarns.*

ASTM D2261 (1996) *Standard Test Method for Tearing Strength of Fabrics by the Tongue (Single Rip).*

ASTM D3015 (1978) *Standard Recommended Practice for Microscopical Examination of Pigment Dispersion in Plastic Compounds.*

ASTM D3334 (2001) *Methods of Testing Fabrics Woven from Polyolefin Monofilaments (Discontinued 1990), Replaced By No Replacement.*

ASTM D3417 (1982) *Standard Test Method for Heats of Fusion and Crystallization of Polymers by Thermal Analysis.*

ASTM D3418 (1982) *Standard Test Method for Transition temperatures of Polymers by Thermal Analyses.*

- ASTM D3421 (1975) *Standard Recommended Practice for Extraction and Analysis of Plasticizer Mixtures from Vinyl Chloride Plastics.*
- ASTM D3776 (1979) *Standard Test Method for Weight (Mass per Unit Area) of Woven Fabric.*
- ASTM D3895 (2002) *Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning.*
- ASTM D4060 (1984) *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser.*
- ASTM D4355 (2000) *Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus.*
- ASTM D4364 (2002) *Standard Practice for Performing Outdoor Accelerated Weathering Tests of Plastics Using Concentrated Sunlight.*
- ASTM D4439 (1995) *Standard Terminology for Geosynthetics.*
- ASTM D4833 (1988) *Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Relatex Products.*
- ASTM D4885 (1988) *Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method.*
- ASTM D5199 (1995) *Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes.*
- ASTM D5321 (1992) *Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method.*
- ASTM D5322 (1992) *Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids.*
- ASTM D5397 (1995) *Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Tensile Load Test.*
- ASTM D5494 (1993) *Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture resistance of Unprotected and Protected Geomembranes.*

- ASTM D5496 (1996) *Standard Practice for in Field Immersion Testing of Geosynthetics.*
- ASTM D5596 (2000) *Standard Test Method for Microscopic Evaluation on the dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics.*
- ASTM D5721 (1995) *Standard Practice for Air-Oven Aging of Polyolefin Geomembranes*
- ASTM D5747 (1995) *Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geomembranes to Liquids.*
- ASTM D5819 (1999) *Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability.*
- ASTM D5970 (2000) *Standard Practice for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure.*
- ASTM D5994 (1996) *Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes.*
- ASTM D6370 (1999) *Standard Test Method for Rubber-Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA).*
- ASTM E96 (1980) *Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials.*
- ASTM E145 (1999) *Specifications for Gravity-Convection and Forced – Ventilation Ovens.*
- ASTM E2105 (2000) *Standard Practice for General Techniques of Thermogravimetric Analysis (TGA) Coupled With Infrared Analysis (TGA/IR).*
- ASTM G22 (1980) *Standard Test Method for Determining Resistance of Plastic to Bacteria.*
- ASTM G26 (1996) *Practice for Operating Light-Exposure Apparatus (Xenon-Arc Type) With and Without Water for Exposure of Nonmetallic Materials (Discontinued 2000), Replaced By G155.*
- ASTM G53 (1996) *Practice for Operating Light- and Water-Exposure Apparatus (Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials (Withdrawn 2000), Replaced By G154.*
- ASTM G154ae1 (2000) *Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.*

- ADAMS, M.W. (1997) – *Application of HDPE at a Sewage Treatment Plant - Geotextiles and Geomembranes*, vol. 15, n. 04-06, pp. 269 – 276, Elsevier Science Publishers Ltd, 1997.
- AGNELLI, J.A.M. (2000) – *Introdução a Materiais Poliméricos*, Apostila, DEMA, UFSCar, São Carlos, 282 p.
- AGNELLI, J.A.M. (2002) – *Técnicas de Caracterização Utilizadas em Materiais Poliméricos*, Apostila, DEMA, UFSCar, São Carlos, 200 p.
- ARTIERES, O., GOUSSE, F, and PRIGENT, E. (1991) - *Laboratory-Aging of Geomembranes in Municipal Landfill leachates* - Proceedings Sardinia 91, Italy, pp.587-603.
- BAILEY, L.C. and MEDWICK, T. (1993) – *Mean Kinetic Temperature – a Concept for Storage of Pharmaceuticals* – Pharmacopeial Forum, 1993, 19 (5) : 6163 – 6166.
- BAKER, T.I., (1997) – *Long-term relationship of outdoor exposure to Xenon-Arc test apparatus* - Proceedings of the Geosynthetics '97, IFAI, St. Paul, MN, pp. 177-199.
- BELL, J.R. and YODER, E.J. (1957) apud KOERNER (1991) – *Plastic Moisture Barrier for Highway Subgrade Protection* - Proc. Highway Research Board, Washington, DC, vol. 36, 1957, pp. 713 – 735.
- BELLEN, G., CORRY, R. and THOMAS, M.L. (1987) – *Development of Chemical Compatibility Criteria for Assessing Flexible Membrane Liners* - EPA 600/2-87/067 (NTIS no. PB 87-227 310). U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 492 pp.
- BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J.G & ADAM, D. (2002) – *Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances* - Proc. 7th Int. Conf. On Geosynthetics, Vol. 2, p.445-507, Nice, France.
- BOVE, J.A. & SMITH, W.L. (1990) – *Ultrasonic Seams* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 09, n. 04-06, pp. 325 – 331, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.
- BRADY, K.C., McMAHON, W., LAMMING, G., (1994) - *Thirty-year ageing of plastics* - Project Report 11, Transport Research Laboratory, E472A/BG, ISSN 0968-4083.
- BREUL, B., CARROGET, J. & HERMENT, R. (1998) – *Automatic Ultrasonic Seam Tester for Bituminous Geomembranes – Development and field Results* – Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Rowe, R.K., Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 345 – 348.

- BUENO B.S. (2003) – *Propriedades, Especificações e Ensaio* - IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2003) e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2003), 20 a 23 de maio de 2003, PUC, Porto Alegre (RS), 15 páginas (CD Rom).
- CALABRIA, C.R. & PEGGS, I.D. (1997) – *Investigation of Geomembrane Destructive Field Seam Test Failures : Landfill Cover - Geotextiles and Geomembranes*, vol. 15, n. 04-06, pp. 419 - 440, Elsevier Science Publishers Ltd, 1997.
- CASSIDY, L., BRIGHT, D.G. (1995) - *Durability of Geosynthetics exposed to Nine Years of Natural Weathering*, Geosynthetics 95, pp. 841-851.
- CAZZUFFI, D.A., PUCCIO, M. and VENESIA, S. (1983) – *Essai de résistance à l'abrasion de membranes feuilles et revêtements pour des ouvrages hydrauliques* - C.R. Colloque sur L'Etanchéité des Ouvrages Hydrauliques, Paris, February.
- CAZZUFFI, D.A. & VENESIA, S. (1990) – The Use of Thermal Analysis for the Evaluation of the Durability of a 24-Year-Old PVC Geomembrane – *Geosynthetics : Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I.D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 17 – 25.
- CAZZUFFI, D., FEDE, L., VILLA, C., MONTANELLI, F., and RIMOLDI, P. (1995) - *The Assessment of the Effects of Natural and Lab Weathering Exposure of Geosynthetics*, Proceedings Sardina 95, pp. 387-396.
- COMER, A. I., HSUAN, Y. G. and KONRATH, L. (1998) - *The performance of Flexible Polypropylene Geomembranes in Covered and Exposed Environments*, Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol.1, Atlanta, March. Industrial Fabric Association International, St Paul, N, USA, pp. 359-362.
- COOK , M.D, HASKINS, P.J. (1998) – *The Development of a New Arrhenius Based Burn Model for Both Homogeneous and Heterogeneous Explosives* – Session G1, Nitromethane, MIXED Session, July, 29, CCA.
- DEGEIMBRE, D.A. (1980) – *Determination of the Geotextiles Resistance to fungi attack* - Internal report. LMC, University of Liege.
- DEGEIMBRE, R., RIGO, J.M. and WIERTZ, J. (1991) – *Biological Resistance Testing*, pp. 308 – 315 - RILEM: Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes - Geomembranes : Identification and Performance

- Testing – Rollin, A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.
- DIEBEL, P. (2000) - *PVC: A Long History, A Bright Future*, Geotechnical Fabrics Report, May 2000.
- DIN 53 726: *Ensaaios de plásticos; determinação do número de viscosidade e valor K de polímeros de cloreto de vinila (VC)*.
- DUDZIK, B. E. and TISINGER, L. G. (1990) - *An Evaluation of Chemical Compatibility Test Results of High Density Polyethylene Geomembrane Exposed to Industrial Waste Leachate*, pp 37-54, Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, ASTM STP 1081, Robert M. Koerner, editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
- DUQUENNOI, C., BERNAHRD, C., GAUMET, S. (1995) - *Laboratory Aging of Geomembranes in Landfill Leachates*, Proceedings Sardina 95, Fifth International Landfill Symposium, Italy, 1995, pp. 397-404.
- EITH, A.W. & KOERNER, G.R. (1997) – *Assessment of HDPE Performance in a Municipal Waste Landfill Double Liner System After Eight Years of Service* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 15, n. 04-06, pp. 277 – 287, Elsevier Science Publishers Ltd, 1997.
- EPA METHOD 9090. *Compatibility Tests for Wastes and Membrane liners in EPA SW-846*, Test Methods for Evaluating Solid Waste, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- FAYOUX, D, GOUSSE, F., and RUMMENS, F. (1993) - *Assessment on a PVC Geomembrane in a Landfill After Ten Years*, Proceedings Sardina 93, pp. 369-378.
- FILZ, G.M., ESTERHUIZEN, J.J.B. & DUNCAN, J.m. (2001) – *Progressive failure of lined wasteimpoundments* - Journal of Geotechnical and Geoevvironmental Engineering 127 (10), pp. 841-848.
- FRATTINI, G. (1997) – *Influência do Sistema de Coleta de Lixo Urbano no Desempenho Mecânico de Mistura de PET e HDPE Reciclados* - Projeto de Qualificação, UFSCar, São Carlos, 1997.
- GÄCHTER, R. & MÜLLER, H. (1993) - *Plastics Additives Handbook*. Munich, Hanser Publishers, 1993, 754 p.

- GEOSYNTEC, Inc., (1989) - *Preliminary assessment of stress cracking of polyethylene liners*. Draft Report to USEPA, Task 6, Work Assignment 68-3, for NUS Corp., 27pp.
- GILBERT, R.B. (2001) - *Peak versus residual strength for waste containment systems* - Proceedings 15th GRI Conference, Houston, pp. 29-39.
- GIROUD, J.P. (1984) - *Analysis of Stresses and Elongations in Geomembranes*, Proceedings of the International Conference on Geomembranes, Denver, Vol. 2, pp. 481-486, 1984
- GIROUD, J.P. & MOREL, N. (1992) - *Analysis of Geomembrane Wrinkles* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 11, n. 03, pp. 255 - 276, Elsevier Science Publishers Ltd, Editor : T.S. Ingold, 1992.
- GRASSIE, N., and SCOTT, G., (1985) - *Polymer Degradation and Stabilization*, Cambridge University Press, New York, N.Y.
- GRI TEST METHOD GM10 (2002) - *Specification for the SCR of HDPE Geomembranes*.
- GRI TEST METHOD GM11 (2000) - *Accelerated Weathering of Geomembranes using a Fluorescent UVA-Condensation Exposure Device*.
- GRI TEST METHOD GM13 (2000) - *Test Properties, Testing Frequency and Recommended Warranty for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*.
- GRI TEST METHOD GM19 (2002) - *Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes*.
- HAGE Jr., E. (2003) - Departamento de Engenharia de Materiais (Dema) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos (SP) - *Comunicação Pessoal*.
- HALSE, Y., WIERTZ, J., RIGO, J.M. & CAZZUFFI, D.A. (1991) - *Chemical Identification Methods used to Characterize Polymeric Geomembranes*, pp. 316 - 335, RILEM : Report of Technical Committee 103 - MGH - Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes - Geomembranes : Identification and Performance Testing - Rollin, A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.
- HAXO, H.E. et al. (1982) apud RIGO and CAZZUFFI (1991) - *Liner Materials Exposed to Municipal Solid Waste Leachate* - EPA/600/2 - 82/097.

- HAXO, H., and NELSON, N. (1984) - *Factors in the Durability of Polymeric Membrane Liners*, International Conference on Geomembranes Denver, USA, 1984, pp. 287-292.
- HAXO, H.E, HAXO, R.S., NELSON, N.A., HAXO, P.D., WHITE, R.M. & DAKESSIAN, S. (1985a) - *Liners Materials Exposed to Hazardous and Toxid Wastes* – EPA – 600/2-84-169 (NTSI no. PB 85-121-333). U. S. EPA, Cincinnati, OH. 256 pp.
- HAXO, H.E, HAXO, P.D., WHITE, R.M. & FONG, M.A. (1985b) - *Liner Materials Exposed to Municipal Solid Waste Leachate* - Waste Management and Research 3. pp. 41 – 54.
- HAXO, H.E, HAXO, R.S., NELSON, N.A., HAXO, P.D., WHITE, R.M. and DAKESSIAN, S. (1986) - *Liners Materials Exposed to Toxid and Hazardous Wastes*. Waste Management and Research 4. pp. 247 – 264.
- HAXO, H.E., LAHEY, T.P. and ROSENBERG, M.L. (1988) – *Factors in Assessing the Compatibility of FMLs and Waste Liquids* - EPA/600/2-88/017 (NTSI no. PB 88-173-372/AS). U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH., 143 pp.
- HAXO JR, H.E., & HAXO, P.D. (1988) – *Consensus Report of the Ad Hoc Meeting on the Service Life in Landfill Environments Flexible Membrane Liners and Others Synthetic Polymeric Materials of Construction*, Matrecon. Inc. Alameda, CA, USA. Report to USEPA.
- HAXO, H. and HAXO, P. (1989) - *Environmental Conditions Encountered by Geosynthetics in Waste Containment Applications*, Durability and Aging of Geosynthetics, Edited by Koerner R.M., 1989, pp. 28-47.
- HAXO JR, H.E. & KAMP, L.C. (1990) – *Destructive Testing of Geomembranes Seams : Shear and Peel Testing of Seam Strength - Geotextiles and Geomembranes*, vol. 09, n. 04-06, pp. 369 – 395, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.
- HAXO, H, E. (1991) - *Compatibility of Flexible Membrane Liners and Municipal Solid Waste Leachates*, EPA/600/2-91/040, USEPA, Washington, D.C., August, 1991.
- HENNINGER, F., GUGUMUS, F. and PEDRAZZETI, E. (1986) – *Processing, Heat and Light Stabilization of Polyolefins*, CIBA-GEIGY, Argentina, 1986.
- HOWARD, J.B. (1973) – *Data for control of stability in polyolefin wire and cable compounds* – Polymer Engrg. Sci., 13 (6), 429 – 434.

- HSUAN, Y.G., LORD Jr., A.E., KOERNER, R.M., (1991) - *Effects of outdoor exposure on high density polyethylene geomembrane* - Geosynthetics 91 Conference Proceedings, Atlanta, USA. IFIA, St Paul, MN, USA, pp.287–302.
- HSUAN, Y.G. and KOERNER, R.M. (1995) – *Long Term Durability of HDPE Geomembranes: Part I – Depletion of Antioxidants*, GRI Report 16, 35p.
- HSUAN, Y.G., KOERNER, R.M., (1998) - *Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 532–541.
- HSUAN, Y. G. and GUAN, Z. (1998) - *Antioxidant depletion During Thermal Oxidation of High Density Polyethylene Geomembranes*, Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, March. Industrial Fabric Association International, St Paul, N, USA, pp. 375-380.
- HSUAN, Y. G. (2000) - *Data base of field incidents used to establish HDPE geomembrane stress crack resistance specifications* - Geotextiles and Geomembranes 18 (2000), págs 1-22.
- ISO 174: *Plásticos. Determinação do número de viscosidade de resinas de PVC, em solução diluída.*
- KAO, N., BHATTACHARYA, S.N., SHANKS, R. AND COOPES, I.H. (1998) – *The Effect of Temperature on the Viscoelastic Properties of Model and Industrial Dispersions* – Journal of Rheology, vol. 42, Issue 3 (May – June, 1998).
- KOCH, R., GAUBE, E., HESSEL, J., GONDRO, C. & HEIL, H. (1988) – *Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylene*, Mull und Abfall, Vol. 8, pp. 348 – 361.
- KOERNER, R.M & LORD JR, A.E. (1990) – *Nondestructive Evaluation of Geomembrane Seams : Methods in Development* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 09, n. 04-06, pp. 431 – 443, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.
- KOERNER, R.M.(1991) – *Geomembrane Overview – Significance and Background*, pp. 03 – 21, RILEM : Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes - Geomembranes : Identification and Performance Testing – Rollin, A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.
- KOERNER, R.M., LORD, A.E., JR & HSUAN, Y.H. (1992) – *Arrhenius modelling to predict geosynthetic degradation geotextiles and*

- geomembranes* - pp 151 - 183 - Elsevier Science Publishers LTD, England.
- KOERNER, G.R. and KOERNER, R.M. (1995) - *Temperature Behavior of Field Deployed HDPE Geomembranes* - *Geosynthetics* 95, pp. 921-937.
- KOERNER, R.M., WILSON FAHMY, R. (1995) - *Geosynthetics for geoenvironment applications* - *Geoenvironment 2000* - vol 1 - New Orleans - Louisiana.
- KOERNER, R.M. (1996) - *Concepts for landfill liner design in the USA* - First Germany/USA Geomembrane Workshop, Berlin, Germany, 10-11 Junho de 1996 - *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 14, 1996.
- KOERNER, R.M. (1998) - *Designing with Geosynthetics*, 3rd Ed. Prentice Hall Publ. Co., Englewood Cliffs - págs 426 - 469.
- LANDRETH R. (1989) - *Durability of Geosynthetics in Waste Management Facilities: Needed Research*, *Durability and Aging of Geosynthetics*, Edited by Koerner R.M., 1989, pp 6-12.
- LAUWERS, D. (1993) - *PVC Geomembrane Case Study - 25 Years Later*, PGI Technical Bulletin, November 1993.
- LECHNER, P. & LANHER, T. (1991) - *Materials for Leachate Collection Systems - Proceedings of 3rd International Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 14 - 18.
- LEVIN, S. B. and HAMMOND, M. D. (1990) - *Examination of PVC in a Top Cap Application*, pp.369-381, *Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications*, ASTM STP 1081, Robert M. Koerner, editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
- LORD JR, A.E., HALSE, Y.H. & KOERNER, R.M. (1990) - *Emerging Methods for Geomembranes Seaming* - *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 09, n. 04-06, pp. 357 - 367, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.
- LORD, A, and HALSE, Jr. (1995) - *Polymer Durability - The Materials Aspects*, *Proceedings Sardina* 95, pp. 387-396.
- LÜDERS, G. (1998) - *Assessment of Seam Quality and Optimization of the Welding Process of HDPE Geomembranes* - *Sixth International Conference on Geosynthetics*, Conference Proceedings, Rowe, R.K.,

- Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 337 - 334.
- MAIA, I.S. (2001) - *Avaliação da Degradação de Propriedades Mecânicas de Geomembranas de PEAD e PVC*, Dissertação de Mestrado, 175 págs, EESC (USP), São Carlos, 2001.
- MAISONNEUVE, C., PIERSON, P., DUQUENNOI, C., MORIN, A., (1998) - *Assessing the long term behavior of geomembranes in multi-factor environments* - Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol.1, Atlanta, March. Industrial Fabric Association International, St Paul, N, USA, pp.355-358.
- MANRICH, S., FRATTINI, G. e ROSALINI, A.C. (1997) - *Identificação de Polímeros : uma ferramenta para a reciclagem* - São Carlos: EDUFSCar, 49p.
- MÉTODO L1.030 (CETESB) - *Impermeable Membranes and Residues - Evaluation of Compatibility*.
- MILANO, R. (1999) - *Instalação de geomembranas*, In: 1º Curso Catarinense, Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente, pp. 212 - 226.
- MITCHELL, D.H. & SPANNER, G.E. (1985) - *Field Performance assessment of Synthetic Liners for Uranium Tailings Ponds*, status Report, Battelle PNL, U.S. NRC, NUREG/CR-4023, PNL - 5005, January, 1985.
- MITCHELL, J.K., SEED, R.B. & SEED, H.B. (1990) - *Kettleman hills waste landfill slope failure I : liner-system properties* - Journal Geotechnical Engineering 116 (4): 647-668.
- MLYNAREK, J., MARCOTTE, M. & SARAZIN, P. (1998) - *Termal treatment of HDPE Geomembrane Sheets* - Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Rowe, R.K., Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 323 - 330.
- MORRISSON, W.R. and PARKHILL, L.O. (1987) - *Evaluation of Flexible Membrane Liner Seams after Chemical Exposure and Simulated Weathering* - EPA - 600/2-87-015. U. S. EPA, Cincinnati, OH - 296 pp.
- MORRISON, W.R. & SWIHART J.J. (1990) - *Bureau of Reclamation Experiences with PVC Seams* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 09, n. 04-06, pp. 343 - 355, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.

NBR 13610: *Resinas de PVC - Determinação do valor K*.

NEWMAN, E., STARK, T.D., ROHE, F.P. (2001) - *PVC Aquaculture Liners Stand the Test of Time*, Geotechnical Fabrics Report, September 2001.

NF X 41-514 (1961) - *Plastic Materials Protection* - part 2: Test Methods for Determining the Microorganism Resistance of Manufactured Products.

NUNES, L.R., RODOLFO JR, A. e ORMANJI, W. (2002) - *Tecnologia do PVC (Braskem)* - Editor Vicente Wissenbach, 400 págs.

OVERMANN, L.K. (1990) - *Geomembrane Seam Nondestructive Tests : Construction Quality Control (CQC) Perspective* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 09, n. 04-06, pp. 415 - 429, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.

OVERMANN, L.K., COWLAND, J.W., MATTRAVERS, N.K., SHUNG, W.K., LEE, B.S., and WAN, C.H. (1993) - *Chemical Resistance Testing of Liner Materials for Hong Kong Landfills*, Proceedings Sardina 93, Fourth International Landfill Symposium, pp. 333-347.

OZSU, E. & ACAR, Y.B. (1992) - *Liquid Conduction Tests for Geomembranes* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 11, pp. 291 a 318, Elsevier Science Publishers Ltd, 1992.

PASQUALINI, E., SANI, D. e ROCCATO, M. (1993) - *Factors influencing geomembrane interface friction* - Proceedings of the Symposium Green 93 - geotechnics related to the environment - Bolton - U.K. - 28 Jule - 1 Jule - edited by R.W. Sarsby.

PEGGS, I.D. (1988) - *Failure and remediation of a geomembrane lining system*. Geotechnical Fabrics Report 6 (6), 13-16.

PEGGS, I.D., CARLSON, D.S., (1989) - *Stress cracking of polyethylene geomembrane: field experience*. In: Koerner, R.M. (Ed.), *Durability and Aging of Geosynthetics*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Amsterdam, Netherlands, pp.195-211.

PEGGS, I.D. (1990) - *Destructive Testing of Polyethylene Geomembrane Seams : Various Methods to Evaluated Seam Strength* - Geotextiles and Geomembranes, vol. 09, n. 04-06, pp. 405 - 414, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.

- PEGGS, I.D. (1992) – *Whiter PVC (Qual o destino do PVC ?) - PVC and HDPE geomembranes for municipal waste landfill liners and covers - The facts* - Pennsylvania - USA.
- PEGGS, I.D. (1993) - *Geomembranes for Landfill Liners and Covers: Is There a Choice?* - Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, p.325-332.
- PEGGS, I.D. (1997) - *We Need to Reassess HDPE Seam Specifications* - Geotechnical Fabrics Report, June-July 1997, pp. 46, 47.
- PETERMANN, J., MILES, M., GLEITER, H., (1976) - *Growth of polymer crystals during annealing*. Journal of Macromolecular Science-Physics B 12 (3), 393–404.
- PIERSON, P., PELTE, T., and GOURC, J.P. (1993) - *Behavior of Geomembranes Exposed to Solar Radiation*, Proceedings Sardinia 93, pp. 349-356.
- POHL, D.H., WESTON, R.F. (1992) – *Geomembranas: Aplicações e considerações sobre a qualidade e confiabilidade e controle de qualidade* - Seminário sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia - Brasília (DF); 2º simpósio brasileiro sobre aplicações de geossintéticos - São Paulo - Junho 1995.
- prEN 13491- (2002) (E) - *Geosynthetic barriers - Characteristics required for use as a fluid barrier in the construction of tunnels and underground structures*.
- RAMKE, H.G. (1989) – *Leachate Collection Systems in Sanitary Landfill: Processes, Technology and Environmental Impact*. Eds. Christensen, T.H., Cossy, R. and Stegmann, R. Academic Press, London, pp. 343 – 364.
- REDDY, D.V. and BUTUL, B. (1999) - *A comprehensive literature review of liners failures and longevity*, submitted to Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management University of Florida, July 12, 1999, 156p.
- REMÉDIO, M.V.P. (1999) – *Estudo da Viabilidade de Reciclagem de Plásticos em forma de Filme provenientes do Rejeito de uma Usina de Reciclagem de Resíduos Sólidos Urbanos* – Dissertação de Mestrado, 156 p., Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) da Universidade Federal de São Carlos, Edufscar.
- RIGO, J.M & CAZZUFFI, D.A. (1991) – *Test Standarts and their Classification*, pp. 22 – 58, RILEM : Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes -

- Geomembranes : Identification and Performance Testing – Rollin, A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.
- ROLLIN, A.L., VIDOVIC, A., DENIS, R. & MARCOTTE, M. (1990) – *Microscopic Evaluation of High-Density Polyethylene Geomembrane Field- Welding Techniques - Geosynthetics : Microstructure and Performance*, ASTM STP 1076, I.D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 34 – 47.
- ROLLIN, A.L. & RIGO, J.M. (1991) – *Geomembranes : Identification and Performance Testing* – Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hydraulic Testing of Geomembranes – RILEM, Rollin, A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.
- ROLLIN, A.L., MLYNNAREK, J., LAFLEUR, J., and ZANESCU, A. (1991) - *The Investigation of a Seven Year Old HDPE Geomembrane Used in a Landfill*, Proceedings Sardina 91, pp. 667-677.
- ROLLIN, A.L., MONTGRAIN, F., LAFLEUR, P. & MARANDA, L. (1998) – *The Influence of the Welding Parameters on HDPE Geomembranes*, Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Rowe, R.K., Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 331 - 335.
- ROWE, R.K. (1998) – *Geosynthetics and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste*, Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Rowe, R.K., Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 27 - 102.
- ROWE, R.K., HSUAN, Y.G., LAKE, CB., SANGAM, P. & USHER, S. (1998) – *Evaluation of a Composite (Geomembrane/Clay) Liner for a Lagoon After 14 Years of Use* - Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Rowe, R.K., Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 233 – 238.
- ROWE, R.K and SANGAM, H.P. (2002) - *Durability of HDPE geomembranes*, Review Article, Geotextiles and Geomembranes 20 (2002), 77–95, Elsevier Science Publishers Ltd, 2002.
- SAUNDERS, K.J. (1973) - *Organic Polymer Chemistry*, London, Chapman and Hall Ltd., 1973, 473 p.
- SEED, R.B., MITCHELL, J.K. & SEED, H.B. (1990) – *Kettleman hills waste landfill slope failure II : stability analysis* - Journal of Geotechnical Engineering 116 (4): 669-689.

- SHARMA, H.D. and LEWIS, S.P. (1994) - *Waste containment System, waste stabilization and landfills: design and evaluation*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- SIA 280 (1975) apud DEGEIMBRE (1991) - *Test Methods on Materials, Waterproofing Membranes in Plastic Materials*.
- SMITH, G.D., KARLSOON, K. & GEDDLE, U.W. (1992) - *Modelling antioxidants loss from polyolefins in hot-water applications, I: Model and application to medium density polyethylene pipes* - Polymer Engrg. And Sci., 32 (10), 658-667.
- SPARGUE, R.T., & FROBEL, R.K. (1990) - *Performance test methods for geomembranes and geocomposites used in the design of waste containment facilities*. In: Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, ASTM ASTP 1081, R. M. Koerner, ED., ASTM, Philadelphia, 1990.
- STAFF, C.E. (1984) - *The Foundation and Growth of the Geomembrane Industry in the United States*, Proc. Intl. Conf. On Geomembranes, Denver, CO, 1984, IFAI, pp. 5 - 8.
- STRUİK, L.C.E. (1978) - *Physical aging in amorphous polymers and others materials* - Elsevier Scientific Publishing Company, Amstersam, The Netherlands.
- STRUVE, F. (1990) - *Extrusion Fillet Welding of Geomembranes - Geotextiles and Geomembranes*, vol. 09, n. 04-06, pp. 281 - 293, Elsevier Science Publishers Ltd, 1990.
- SUITS, L.D. & HSUAN, Y.G. (2003) - *Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer*, Geotextiles and Geomembranes 21 (2003), technical note, pp. 111-122.
- SURMANN, R., PIERSON, P., COTTOUR, P. (1995) - *Geomembrane Liner Performance and Long Term Durability*, Proceedings Sardina 95, Fifth International Landfill Symposium, Italy, 1995, pp. 405-414.
- TAYLOR, F. (1991) - *Geotechnical Fabrics Report*, pp. 22, Julho/Agosto.
- TCHOBANOGLIOUS, G. & BURTON, F.L. (1991) - *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*/Metcalf & Eddy, Inc., 3rd edition, McGraw Hill, pp. 109.

- TELLES, R.W., LUBOWITZ, H.R., UNGER, S.L., (1984) - *Assessment of environmental stress corrosion of polyethylene liners in landfills and impoundments*. Report on Contract 68-03-3218, US EPA, Cincinnati, OH, 89pp.
- THOMAS, R.W. (1998) - *Evaluating the Stress Crack Resistance of HDPE Seams* - Sixth International Conference on Geosynthetics, Conference Proceedings, Rowe, R.K., Ed., Atlanta, Georgia, USA, 25 a 29 March, 1998, vol.1, pp. 349 - 352.
- THIEL, R.T. (2001) - *Peak versus residual shear strength for landfill bottom liner stability analyses* - Proceedings 15th GRI Conference, Houston, pp. 40-70.
- TIKUISIS, T., LARN, P. & COSSAR, M. (1993) - *High pressure oxidative induction time analysis by differential scanning calorimetry - MOC/MOA and COC/COA of Geosynthetics*, R.M. Koerner and Y.G. Hsuan, eds. GRI Conference Series, IFAI, St. Paul, Minn. 191-201.
- TISINGER, L.G. & CARRAHER JR., C.E. (1990) - *Nitric Acid Induced Degradation of High Density and Linear Medium Density Polyethylene: Physical Property Sensing Techniques* - Geosynthetics : Microstructure and Performance, ASTM STP 1076, I.D. Peggs, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 48 - 56.
- TISINGER, L.G., PEGGS, I.D. and HAXO JR, H.E (1991) - *Chemical Compability Testing of Geomembranes*, pp.268 - 307 - RILEM : Report of Technical Committee 103 - MGH - Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes - Geomembranes : Identification and Performance Testing - Rollin, A.L. & Rigo, J.M., eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.
- TISINGER, L.G. & GIROUD, J.P. (1993) - *The Durability of HDPE Geomembranes*, Geotechnical Fabrics Report, Sept., pp. 4 - 8.
- TITOW, W. V. (1984). *PVC Technology*. 4. ed. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- VAN SANTVOORT, G. (1994) - *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*, 1994, p. 517, 518. A.A. Balkema - Rotterdam - Netherlands.
- VAN ZANTEN, R.V. (1986) - *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering* - A.A. Balkema - Rotterdam - Netherlands.

- VASQUEZ, N.R. & SAKELLÁRIOS, A.S. (1980) - *Foto e Termooxidação de Polímeros*. In: Seminário Técnico sobre Polímeros, 1, Salvador – BA, abril/1980, pp.187-205, Anais.
- VIDAL, D., GOURC, J.P., PIERSON, P. (1994) – *Sistemas de Impermeabilização com Geossintéticos* - X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações vol 3 - Foz do Iguaçu.
- VILAR, O. M. (2003) – *Geossintéticos em Aplicações Ambientais* - IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2003), 20 a 23 de maio de 2003, PUC, Porto Alegre (RS), 18 páginas (CD Rom).
- WOODLEY, R.M. (1978) – *Pond Liners Anyone ?* - Military Engineer, vol. 70, no. 458, Nov – Dec., 1978, pp. 392 – 395.
- WHITE, D.F. & VERSCHOOR, K.L. (1990) - *Practical Aspects of Evaluating the Chemical Compatibility of Geomembranes for Waste Containment Applications*, pp. 25-36, Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, ASTM STP 1081, Robert M. Koerner, editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
- WHYATT, G. A. & FRANSWORTH. R. K. (1990) - *The High pH Chemical and Radiation Compatibility of Various Liner Materials*, pp. 110-124, Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, ASTM STP 1081, Robert M. Koerner, editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

ANEXO 1

(RESULTADOS OBTIDOS PARA AS
AMOSTRAS INTACTAS DE PVC E
PEAD)

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios de propriedades físicas das amostras intactas de PEAD e PVC

Geomembrana	Propriedades Físicas		
	Espessura (mm)	Gramatura (g/m²)	Densidade[*]
PEAD 0,80 mm	0,78	776	0,95
<i>CV (%)</i>	<i>0,83</i>	<i>0,66</i>	<i>0,83</i>
PEAD 1,00 mm	0,98	1040	0,95
<i>CV (%)</i>	<i>2,50</i>	<i>2,00</i>	<i>0,90</i>
PEAD 1,00 mm Branca	0,99	1040	0,95
<i>CV (%)</i>	<i>2,80</i>	<i>2,50</i>	<i>0,93</i>
PEAD 1,50 mm	1,49	1700	0,95
<i>CV (%)</i>	<i>0,85</i>	<i>0,91</i>	<i>0,50</i>
PEAD 2,50 mm	2,48	2562	0,95
<i>CV (%)</i>	<i>0,51</i>	<i>0,70</i>	<i>0,44</i>
PVC 1,00 mm	0,99	1287	1,23
<i>CV (%)</i>	<i>0,70</i>	<i>0,65</i>	<i>0,72</i>
PVC 2,00 mm	2,04	2741	1,23
<i>CV (%)</i>	<i>0,52</i>	<i>0,69</i>	<i>0,46</i>

^{*}Densidade é a razão da massa específica da amostra pela massa específica da água (considerada igual a 1,0 g/cm³)

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras intactas de PEAD e PVC nas direções longitudinal (L) e transversal (T)

Propriedades									
e	Escoamento					Ruptura			
	F	F/Larg	σ	ε	E	F (N)	F/Larg	σ	ε ⁽¹⁾
(mm)	(N)	(N/mm)	(MPa)	(%)	(Mpa)	(N/mm)	(MPa)	(%)	
0.80 L	90	15	19	15	332	152	25	32	1093
CV (%)	2,1	2,1	2,1	2,1	18,9	3,8	3,8	3,8	2,1
0.80 T	90	15	19	15	330	137	23	28	1112
CV (%)	2,9	2,9	2,9	2,9	17,7	3,9	3,9	3,9	3,5
1.00 L	85	14	14	14	416	180	30	30	1238
CV (%)	9,8	9,8	9,8	9,8	12,8	11,3	11,3	11,3	4,1
P 1.00 T	90	15	15	14	460	172	29	29	1236
E CV (%)	10,4	10,4	10,4	10,4	9,5	8,9	8,9	8,9	5,4
A 1.50 L	147	24	16	16	305	295	49	33	1307
D CV (%)	2,8	2,8	2,8	2,8	8,9	5,6	5,6	5,6	4,8
1.50 T	145	24	16	15	372	288	48	32	1456
CV (%)	2,1	2,1	2,1	2,1	10,1	2,9	2,9	2,9	2,2
2.50 L	270	45	18	15	406	436	73	29	1277
CV (%)	5,7	5,7	5,7	5,7	10,2	6,1	6,1	6,1	4,4
2.50 T	294	49	20	14,5	381	430	72	29	1302
CV (%)	3,8	3,8	3,8	3,8	10,7	4,2	4,2	4,2	2,4
1.00 L	-	-	-	-	7,2	111	18	18	480
CV (%)	-	-	-	-	1,6	2,5	2,5	2,5	3,3
P 1.00 T	-	-	-	-	6,6	97	16	16	520
V CV (%)	-	-	-	-	2,3	1	0,9	0,9	2,1
C 2.00 L	-	-	-	-	5,9	209	35	17	508
CV (%)	-	-	-	-	3,1	0,9	0,7	0,7	1,9
2.00 T	-	-	-	-	6,3	176	29	15	496
CV (%)	-	-	-	-	2,1	2,2	2,4	2,4	2,1

onde : e = espessura; F = força aplicada; σ = tensão aplicada;
 ε = deformação específica; E = módulo de elasticidade;
CV = coeficiente de variação.

(1): considera-se aqui para o PEAD o valor de ε (%) na ruptura de acordo com a ASTM D638 que considera um comprimento inicial de 33 mm para o cp. Algumas empresas e autores adotam o valor de 50 mm seguindo uma recomendação da norma GM13 (GRI).

Tabela A.3 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras intactas de PEAD e PVC

	e (mm)	Punção		Rasgo
		F (N)	δ (cm)	F (N)
P E A D	0,80 L	389	2,8	126
	CV (%)	1,8	5,4	1,7
	0,80 T	-	-	129
	CV (%)	-	-	2,4
	1,00 L	413	2,3	126
	CV (%)	3,4	7,8	4,2
	1,00 T	-	-	127
	CV (%)	-	-	2,4
	1,50 L	507	1,5	206
	CV (%)	4,8	19	0,6
	1,50 T	-	-	217
	CV (%)	-	-	1,0
	2,50 L	911	1,3	338
	CV (%)	1,3	1,4	2,9
	2,50 T	-	-	344
	CV (%)	-	-	2,2
P V C	1,00 L	266	2,5	52
	CV (%)	2,4	13,4	4,6
	1,00 T	-	-	49
	CV (%)	-	-	1,4
	2,00 L	504	2,3	92
	CV (%)	1,7	3,0	2,6
	2,00 T	-	-	95
	CV (%)	-	-	1,9

onde : F = força máxima em Newton (N); δ = deslocamento em cm

ANEXO 2

(RESULTADOS OBTIDOS PARA AS AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM LIXÍVIA DE ESGOTO DOMÉSTICO E INTEMPÉRIE APÓS 6, 12, 18 e 30 MESES)

Tabela A.4 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas sob efeitos de intempérie (6 meses)

Propriedades										
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	88	15	18	15	441	160	27	33	1194
	CV (%)	6,1	6,1	6,1	6,1	6,3	6,5	6,5	6,5	3,4
	0.80 T	90	15	19	14,5	484	158	26	33	1252
	CV (%)	8,2	8,2	8,2	8,2	0,7	10	10	10	3,7
	2.50 L	293	49	20	15,5	422	475	79	32	1355
	CV (%)	7,4	7,4	7,4	7,4	1,1	4,1	4,1	4,1	1,4
	2.50 T	314	52	21	15	462	447	75	30	1286
	CV (%)	7,7	7,7	7,7	7,7	5,6	9,1	9,1	9,1	5,8
P V C	1.00 L	-	-	-	-	7,2	110	18	18	486
	CV (%)	-	-	-	-	1,5	2,6	2,5	2,5	2,9
	1.00 T	-	-	-	-	7,0	91	15	15	455
	CV (%)	-	-	-	-	1,9	3,2	3,2	3,2	6,7
	2.00 L	-	-	-	-	6,4	196	33	16	472
	CV (%)	-	-	-	-	0,3	5,8	5,9	5,9	0,08
	2.00 T	-	-	-	-	6,6	179	30	15	453
	CV (%)	-	-	-	-	3,4	4,4	4,5	4,5	6,7

Tabela A.5 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em lixívia de esgoto doméstico (6 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	90	15	19	15	449	151	25	31	1098
	CV (%)	1,9	1,9	1,9	1,9	7,7	14	14	14	12
	0.80 T	97	16	20	14	512	150	25	31	1114
	CV (%)	3,4	3,4	3,4	3,4	9,2	6,6	6,6	6,6	4,4
	2.50 L	311	52	21	15	406	478	80	32	1307
	CV (%)	5,2	5,2	5,2	5,2	8,6	2,6	2,6	2,6	3,1
	2.50 T	309	52	21	15	406	461	77	31	1332
	CV (%)	4,1	4,1	4,1	4,1	5,4	5,2	5,2	5,2	3,4
P V C	1.00 L	-	-	-	-	9,1	117	20	20	453
	CV (%)	-	-	-	-	1,5	2,6	2,6	2,6	2,6
	1.00 T	-	-	-	-	9,7	96	16	16	447
	CV (%)	-	-	-	-	2,1	1,6	1,4	1,4	2,6
	2.00 L	-	-	-	-	7,9	217	36	18	452
	CV (%)	-	-	-	-	2,8	2,1	2,3	2,3	3,5
	2.00 T	-	-	-	-	7,7	183	31	15	456
	CV (%)	-	-	-	-	2,5	2,2	2,3	2,3	4,3

Tabela A.6 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas sob efeitos de intempérie (12 meses)

Propriedades										
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	85	14	18	15	493	160	27	33	1202
	CV (%)	5,0	5,0	5,0	5,0	1,9	5,2	5,2	5,2	1,5
	0.80 T	83	14	17	13	564	146	24	30	1251
	CV (%)	2,3	2,3	2,3	2,3	1,7	8,8	8,8	8,8	4,6
	2.50 L	312	52	21	17	378	472	79	31	1265
	CV (%)	5,7	5,7	5,7	5,7	16,7	4,1	4,1	4,1	5,3
	2.50 T	294	49	20	15	446	446	74	30	1273
	CV (%)	3,2	3,2	3,2	3,2	0,9	3,6	3,6	3,6	3,7
	1.00 L	-	-	-	-	7,8	110	18	18	459
	CV (%)	-	-	-	-	9,3	2,8	2,7	2,7	6,7
	1.00 T	-	-	-	-	6,6	97	16	16	520
	CV (%)	-	-	-	-	2,3	1,0	0,9	0,9	2,1
P V C	2.00 L	-	-	-	-	5,9	209	35	17	508
	CV (%)	-	-	-	-	3,1	0,9	0,7	0,7	2,0
	2.00 T	-	-	-	-	6,3	176	29	15	496
	CV (%)	-	-	-	-	2,1	2,2	2,4	2,4	2,1

Tabela A.7 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em lixívia de esgoto doméstico (12 meses)

Propriedades										
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	82	14	17	14,5	499	148	25	31	118
	CV (%)	4,4	4,4	4,4	4,4	4,9	12	12	12	10
	0.80 T	84	14	17	13	534	154	26	32	1203
	CV (%)	3,2	3,2	3,2	3,2	4,4	7,9	7,9	7,9	9,9
	2.50 L	286	48	19	15	388	462	77	31	1290
	CV (%)	6,5	6,5	6,5	6,5	18	2,7	2,7	2,7	0,7
	2.50 T	294	49	20	15	438	446	74	30	1321
	CV (%)	1,6	1,6	1,6	1,6	14	4,7	4,7	4,7	2,5
	1.00 L	-	-	-	-	9,9	113	19	19	447
	CV (%)	-	-	-	-	2,0	2,6	2,7	2,7	3,6
	1.00 T	-	-	-	-	10,0	94	16	16	450
	CV (%)	-	-	-	-	1,6	1,2	1,2	1,2	1,9
P V C	2.00 L	-	-	-	-	8,9	184	32	16	474
	CV (%)	-	-	-	-	1,5	11	3,7	3,7	3,2
	2.00 T	-	-	-	-	8,7	184	31	15	481
	CV (%)	-	-	-	-	1,4	4,0	4,1	4,1	1,9

Tabela A.8 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas sob efeitos de intempérie (18 meses)

Propriedades										
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	75	13	16	15	463	140	23	29	1155
	CV (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,9	2,9	2,9	0,9
	0.80 T	82	14	17	15	554	140	23	29	1200
	CV (%)	8,0	8,0	8,0	8,0	1,2	7,2	7,2	7,2	2,0
	2.50 L	307	51	20	15,5	408	456	76	30	1301
	CV (%)	4,3	4,3	4,3	4,3	6,0	4,8	4,8	4,8	1,1
	2.50 T	306	51	20	15,5	366	451	75	30	1359
	CV (%)	3,6	3,6	3,6	3,6	12,7	3,4	3,4	3,4	3,3
P V C	1.00 L	-	-	-	-	8,7	92	15	15	425
	CV (%)	-	-	-	-	1,1	1,9	1,7	1,7	3,9
	1.00 T	-	-	-	-	8,4	109	18	18	441
	CV (%)	-	-	-	-	1,3	2,2	2,1	2,1	1,9
	2.00 L	-	-	-	-	7,3	186	31	16	477
	CV (%)	-	-	-	-	1,6	0,7	0,5	0,5	2,8
	2.00 T	-	-	-	-	7,7	209	35	17	467
	CV (%)	-	-	-	-	2,7	0,9	0,8	0,8	0,9

Tabela A.9 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em lixívia de esgoto doméstico (18 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	80	13	17	14	484	130	22	27	928
	CV (%)	1,3	1,3	1,3	1,3	0,9	1,3	1,3	1,3	1,9
	0.80 T	93	15	19	13	629	125	21	26	1084
	CV (%)	3,4	3,4	3,4	3,4	7,9	4,3	4,3	4,3	3,4
	2.50 L	312	52	21	15,5	367	461	77	31	1264
	CV (%)	3,5	3,5	3,5	3,5	8,9	1,0	1,0	1,0	0,4
	2.50 T	310	52	21	15	446	489	82	33	1437
	CV (%)	5,7	5,7	5,7	5,7	3,3	0,3	0,3	0,3	3,0
	1.00 L	-	-	-	-	9,3	111	19	19	467
	CV (%)	-	-	-	-	2,1	1,1	1,1	1,1	2,1
P V C	1.00 T	-	-	-	-	9,2	94	16	16	470
	CV (%)	-	-	-	-	0,9	1,9	1,9	1,9	3,7
	2.00 L	-	-	-	-	8,3	202	34	17	482
	CV (%)	-	-	-	-	2,7	1,2	1,4	1,4	2,9
	2.00 T	-	-	-	-	8,0	180	30	15	498
	CV (%)	-	-	-	-	2,0	1,6	1,6	1,6	1,8

Tabela A.10 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas sob efeitos de intempérie (30 meses)

Propriedades										
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	91	15,1	19	17	434	159	26	33	1194
	CV (%)	1,7	1,7	1,7	7,5	7,5	6,6	6,6	6,6	7,4
	0.80 T	93	16	19	16	473	167	28	35	1410
	CV (%)	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7	4,9	4,9	4,9	5,8
	2.50 L	278	46	19	19	373	451	75	30	1260
	CV (%)	1,7	1,7	1,7	1,7	12,4	6,5	6,5	6,5	6,4
	2.50 T	285	47,5	19	17,5	332	434	72,4	29	1260
	CV (%)	0,5	0,5	0,5		6,0	3,3	3,3	3,3	3,4
	1.00 L	-	-	-	-	7,4	103	17	17	460
	CV (%)	-	-	-	-	1,5	0,5	0,6	0,6	1,3
P V C	1.00 T	-	-	-	-	7,7	88	14,7	14,7	478
	CV (%)	-	-	-	-	1,0	0,3	0,2	0,2	1,3
	2.00 L	-	-	-	-	6,3	193	32	16	485
	CV (%)	-	-	-	-	1,2	1,0	0,8	0,8	0,8
	2.00 T	-	-	-	-	6,1	177	30	15	486
	CV (%)	-	-	-	-	1,9	2,0	1,9	1,9	3,8

Tabela A.11 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em lixívia de esgoto doméstico (30 meses)

Propriedades										
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	86	14	18	18	330	161	27	34	1219
	CV (%)	2,1	2,1	2,1	2,1	10,0	3,8	3,8	3,8	1,6
	0.80 T	88	15	18	15	372	155	26	32	1272
	CV (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	20,0	16,0	16,0	16	14,7
	2.50 L	277	46	19	17,5	375	457	76	31	1298
	CV (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	3,7	4,0	4,0	4,0	3,6
	2.50 T	285	48	19	17,5	385	452	75	30	1322
	CV (%)	2,3	2,3	2,3	2,3	14,3	3,4	3,4	3,4	3,6
	1.00 L	-	-	-	-	8,3	107	18	18	457
	CV (%)	-	-	-	-	1,2	1,8	1,5	1,5	2,2
	1.00 T	-	-	-	-	8,4	89	15	15	460
	CV (%)	-	-	-	-	0,1	2,1	1,9	1,9	5,7
P V C	2.00 L	-	-	-	-	7,5	197	33	16	478
	CV (%)	-	-	-	-	3,2	1,5	1,5	1,5	1,6
	2.00 T	-	-	-	-	7,5	179	30	15	479
	CV (%)	-	-	-	-	1,4	1,6	1,7	1,7	2.8

Tabela A.12 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras envelhecidas sob efeitos de intempérie (6, 12, 18 e 30 meses)

		Intempérie 6 meses			Intempérie 12 meses			Intempérie 18 meses			Intempérie 30 meses		
e (mm)		Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
		F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F
		(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)
P E A D	0,80 L	431	3,4	141	402	3,3	133	404	3,1	127	370	2,7	137
	CV (%)	1,8	3,4	2,4	2,5	5,9	0,8	2,9	1,5	2,8	4,4	7,1	1,6
	0,80 T	-	-	134	-	-	147	-	-	129	-	-	137
	CV (%)	-	-	1,3	-	-	2,8	-	-	3,1	-	-	0,6
	2,50 L	947	1,2	450	960	1,3	464	949	1,3	451	861	1,4	385
	CV (%)	1,0	0,9	1,3	0,9	0,9	6,4	0,1	0,9	3,6	0,3	2,6	1,0
	2,50 T	-	-	434	-	-	481	-	-	439	-	-	399
	CV (%)	-	-	3,7	-	-	3,6	-	-	1,3	-	-	0,4
P V C	1,00 L	356	2,7	44	377	2,6	53	378	2,9	57	362	3,3	55
	CV (%)	3,7	3,2	2,5	1,9	4,9	2,0	4,7	9,2	3,8	1,4	2,5	2,1
	1,00 T	-	-	54	-	-	55	-	-	52	-	-	58
	CV (%)	-	-	1,4	-	-	6,4	-	-	0,8	-	-	5,1
	2,00 L	625	2,4	96	630	2,5	102	607	2,6	104	549	2,9	105
	CV (%)	1,4	4,7	2,0	1,3	2,1	2,0	3,8	6,4	5,0	1,1	0,8	4,7
	2,00 T	-	-	103	-	-	111	-	-	102	-	-	106
	CV (%)	-	-	1,8	-	-	2,1	-	-	2,2	-	-	4,0

Tabela A.13 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras envelhecidas em lixívia de esgoto doméstico (6, 12, 18 e 30 meses)

		Lixívia			Lixívia			Lixívia			Lixívia		
		6 meses			12 meses			18 meses			30 meses		
e	(mm)	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
		F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F
		(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)
P E A D	0,80 L	410	2,9	127	373	2,5	131	376	2,5	127	358	2,5	31
	CV (%)	2,5	5,1	1,3	1,6	4,0	2,9	1,2	1,4	4,6	1,1	2,8	0,4
	0,80 T	-	-	126	-	-	134	-	-	133	-	-	134
	CV (%)	-	-	1,2	-	-	4,1	-	-	2,6	-	-	1,1
	2,50 L	944	1,2	373	900	1,3	394	933	1,3	435	863	1,3	397
	CV (%)	1,5	1,3	1,0	0,7	0,9	6,8	0,1	0,4	0,1	0,3	1,8	0,5
	2,50 T	-	-	380	-	-	503	-	-	424	-	-	407
	CV (%)	-	-	1,9	-	-	5,9	-	-	5,8	-	-	0,8
P V C	1,00 L	335	2,4	48	318	2,4	50	327	2,5	48	311	3,1	55
	CV (%)	2,6	7,4	3,7	0,6	2,6	2,5	2,7	4,8	1,2	0,5	1,7	3,8
	1,00 T	-	-	55	-	-	57	-	-	55	-	-	65
	CV (%)	-	-	6,9	-	-	6,8	-	-	3,3	-	-	10,5
	2,00 L	611	2,3	100	538	2,5	105	601	2,6	97	546	2,9	106
	CV (%)	4,8	3,8	3,7	2,2	1,4	2,3	0,5	0,7	4,4	1,5	2,0	3,3
	2,00 T	-	-	105	-	-	108	-	-	108	-	-	109
	CV (%)	-	-	2,1	-	-	1,8	-	-	2,8	-	-	2,3

Tabela A.14 – Valores médios das principais propriedades da lixívia de esgoto doméstico

Período	PROPRIEDADE						
	<i>DBO</i> (mg/l)	<i>DQO</i> Bruta (mg/l)	<i>DQO</i> Solúvel (mg/l)	<i>Sólidos</i> Totais (mg/l)	<i>Amônia</i> (mg/l)	<i>NTK</i> (mg/l)	<i>pH</i> <i>T</i> (°C)
<i>1° Sem 99</i>	307	-	-	-	-	-	6,8 28
<i>2° Sem 99</i>	405	-	-	-	-	-	6,8 29
<i>2° Sem 00</i>	281	657	-	633	-	-	6,9 28
<i>1° Sem 01</i>	354	542	-	653	39	50	6,9 29
<i>2° Sem 01</i>	356	514	-	642	42	65	6,8 29
<i>1° Sem 02</i>	234	499	277	726	24	42	6,9 29
<i>2° Sem 02</i>	235	440	277	587	29	45	6,9 29
Média	310	531	277	648	33	50	6,9 29

Observação: As campanhas para obtenção das propriedades da lixívia tiveram início em 1999 através de pesquisas da área de Hidráulica e Saneamento da FEIS/UNESP.

Tabela A.15 – Dados meteorológicos para o ano 2000

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA - UNESP
DEPARTAMENTO DE FITOSSANIDADE, ENGENHARIA RURAL E SOLOS

Fone: (0XX18) 3743-1180 - [URL://www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.php](http://www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.php)

ILHA SOLTEIRA - SP - Estação Agrometeorológica Automática - Campbell CR-23X

Apoio Financeiro: FAPESP.

VALORES MÉDIOS MENSAIS

VALORES MÉDIOS MENSAIS																			
Dia	TEMPERATURA °C			UMIDADE RELATIVA DO AR %			Pressão Atm	Rad. Global	Rad. líquida	Flx de calor	PAR	Ev TCA	ET _o PN-M	ET _o TCA	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento	Chuva *	Insolação	
-	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	mbar	MJ/m2.dia			mmoles/m2	mm/dia			max.	média	°	mm	h/dia
Jan00	26,9	32,8	20,9	65,8	-	-	-	-	-	-	-	7,5	5,5	6,0	-	1,4	-	181,1	7,5
Fev00	25,9	31,5	21,1	74,2	-	-	-	-	-	-	-	5,3	4,6	5,0	-	1,4	-	344,2	6,4
Mar00	25,0	30,6	21,5	81,3	95,2	56,6	972,7	16,4	11,4	0,9	352,9	3,9	3,5	2,8	5,8	1,2	127,2	10,8	5,2
Abr00	25,3	31,3	19,5	65,3	90,3	40,5	975,1	20,0	13,3	0,8	424,2	6,7	4,4	4,7	5,0	1,2	116,5	25,1	9,2
Mai00	22,1	28,9	16,1	65,2	91,2	38,3	976,5	15,7	10,0	0,8	333,2	4,1	3,2	2,8	5,4	1,2	130,3	25,4	7,9
Jun00	22,8	29,8	16,3	58,4	86,8	33,8	976,8	15,5	9,2	0,6	318,2	5,7	3,5	3,3	5,7	1,4	106,2	4,6	9,1
Jul 00	19,3	26,8	12,8	55,3	81,8	30,3	977,6	16,1	9,3	0,8	315,6	5,7	3,3	3,3	6,7	2,0	126,5	27,2	8,0
Ago00	23,0	30,5	16,7	59,3	87,0	33,7	975,9	17,2	10,2	1,0	344,2	5,6	3,5	3,7	7,4	1,7	114,9	103,1	7,9
Set 00	23,8	29,8	19,0	68,5	89,0	44,6	975,0	18,0	11,8	1,2	364,9	5,8	3,9	3,8	7,3	2,1	108,2	138,2	7,0
Out00	27,6	34,8	21,5	56,4	82,8	30,3	973,0	22,7	14,4	1,3	445,6	7,1	4,5	5,1	7,1	1,5	142,9	72,6	7,9
Nov00	26,6	32,7	21,7	66,1	88,1	40,5	970,7	24,4	15,8	1,3	488,6	7,3	4,9	5,3	7,6	1,9	133,8	104,7	9,0
Dez00	25,9	31,8	21,3	73,2	91,6	46,1	971,8	22,2	13,5	1,3	452,8	7,7	5,3	4,4	6,8	1,5	143,3	242,9	6,9
Média	24,5	30,9	19,0	65,8	88,4	39,5	974,5	18,8	11,9	1,0	384,0	6,0	4,2	4,2	6,5	1,5	125,0	1279,9	7,7

Obs.: * Chuvas Totais.

ET_o = Evapotranspiração de Referência; P.M. = Penman-Monteith (cálculo a cada hora); TCA = Tanque Classe A (leituras diárias)

Tabela A.16 – Dados meteorológicos para o ano 2001

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA - UNESP
DEPARTAMENTO DE FITOSSANIDADE, ENGENHARIA RURAL E SOLOS

Fone: (0XX18) 3743-1180 - URL: www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.php

ILHA SOLTEIRA - SP - Estação Agrometeorológica Automática - Campbell CR-23X

Apoio Financeiro: FAPESP.

VALORES MÉDIOS MENSAIS

VALORES MÉDIOS MENSAIS																			
Dia	TEMPERATURA °C			UMIDADE RELATIVA DO AR %			Pressão Atm	Rad. Global	Rad. líquida	Flix de calor	PAR	Ev TCA	ET _o PN-M	ET _o TCA	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento	Chuva *	Insolação	
-	Média	Máxima	Minima	Média	Máxima	Minima	mbar	MJ/m2.dia			mmoles/m2	mm/dia			max.	média	°	mm	h/dia
Jan01	26,6	32,5	21,9	71,9	91,9	44,9	973,6	23,0	15,6	1,3	477,6	5,7	4,9	4,0	6,4	1,2	135,4	204,8	7,4
Fev01	26,4	32,6	22,0	76,2	93,6	48,2	973,0	22,5	15,6	1,4	461,7	5,6	4,8	4,1	6,1	1,1	154,2	162,3	7,5
Mar01	26,5	32,6	21,8	73,9	94,6	45,5	973,3	21,8	15,3	1,3	442,5	5,7	4,8	4,0	6,0	1,2	139,0	164,1	8,2
Abr01	26,6	32,7	21,4	66,1	90,1	39,7	975,0	18,1	12,6	1,0	389,9	5,6	4,3	3,9	5,6	1,3	122,3	79,8	8,2
Mai01	21,3	27,0	16,1	71,2	93,4	45,7	976,1	14,1	9,0	0,8	284,3	3,8	2,8	2,6	5,5	1,4	125,2	87,1	6,8
Jun01	20,0	26,0	14,6	69,5	91,8	44,7	978,9	12,6	7,8	0,8	261,4	3,8	2,5	2,7	5,5	1,5	119,6	19,8	8,4
Jul01	21,8	29,2	15,2	60,7	91,2	33,5	977,3	14,6	9,3	1,0	303,9	5,0	3,2	3,2	6,2	1,5	109,7	9,1	8,9
Ago01	23,9	30,8	17,9	52,5	78,5	29,4	977,5	16,1	10,3	1,2	332,5	6,3	3,9	4,0	7,3	2,1	94,7	16,8	8,1
Set01	25,1	32,0	18,8	54,2	81,0	30,9	974,1	18,6	12,1	1,3	377,2	7,4	4,5	4,7	7,7	2,2	118,0	50,6	8,8
Out01	26,0	32,1	19,8	62,4	88,1	33,0	973,2	22,1	14,1	1,4	419,3	6,9	5,0	4,5	6,5	1,6	136,6	48,8	8,5
Nov01	26,1	31,6	21,7	73,6	92,8	48,5	971,5	21,4	13,8	1,3	414,6	5,7	4,5	4,0	6,7	1,4	149,7	183,9	7,5
Dez01	25,4	30,8	21,3	74,8	92,7	50,2	971,5	22,0	14,1	1,2	425,7	5,1	4,4	3,5	6,3	1,4	162,2	0,0	6,3
Média	24,6	30,8	19,4	67,3	90,0	41,2	974,6	18,9	12,5	1,2	382,5	5,6	4,1	3,8	6,3	1,5	130,5	1027,1	7,9

Tabela A.17 – Dados meteorológicos para o início de 2002

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA - UNESP
DEPARTAMENTO DE FITOSSANIDADE, ENGENHARIA RURAL E SOLOS

Fone: (0XX18) 3743-1180 - [URL://www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.php](http://www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.php)

ILHA SOLTEIRA - SP - Estação Agrometeorológica Automática - Campbell CR-23X

Apoio Financeiro: FAPESP.

VALORES MÉDIOS MENSAIS

VALORES MÉDIOS MENSAIS																			
Dia	TEMPERATURA °C			UMIDADE RELATIVA DO AR %			Pressão Atm	Rad. Global	Rad. líquida	Flix de calor	PAR	Ev TCA	ET _o PN-M	ET _o TCA	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento	Chuva *	Insolação	
-	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	mbar	MJ/m2.dia			mmoles/m2	mm/dia		max.	média	°	mm	h/dia	
jan 02	26,0	31,7	21,8	74,4	92,8	48,4	971,8	22,1	15,1	1,2	421,6	5,2	4,7	3,6	6,4	1,4	134,6	196,8	7,4
fev 02	25,7	31,2	21,6	77,8	94,4	51,8	972,9	21,2	14,5	1,1	396,9	4,9	4,4	3,5	5,9	1,1	148,3	297,4	7,2
mar02	27,6	33,6	22,7	69,2	92,4	41,2	973,2	23,8	16,6	1,2	447,8	6,8	5,4	4,8	5,2	1,0	133,8	107,2	9,6
abr 02	27,8	34,4	21,7	56,9	86,1	29,4	973,4	21,4	14,2	0,7	395,8	7,2	5,1	4,7	5,8	1,3	115,5	0,8	10,0
mai02	24,0	29,9	19,0	66,0	87,7	41,8	975,8	16,1	10,0	0,6	302,0	4,6	3,3	3,1	6,2	1,6	106,2	52,6	8,1
jun 02	23,9	31,0	17,4	56,0	86,6	28,7	978,0	14,7	9,3	0,8	294,0	5,6	3,4	3,6	5,5	1,4	110,3	0,0	9,6
jul 02	21,2	28,0	15,1	59,2	87,8	33,3	978,1	14,1	8,9	0,7	264,6	5,2	3,1	3,1	5,9	1,5	118,5	44,2	7,4
ago02	25,1	31,6	19,1	51,9	78,3	31,4	976,0	17,9	10,9	0,9	317,6	6,6	4,2	4,2	6,4	1,8	114,1	34,3	8,0
set 02	22,9	29,4	17,4	60,0	83,7	36,0	975,6	18,4	11,6	1,0	300,8	5,4	3,9	3,5	6,5	1,7	119,0	71,1	6,3
out 02	28,2	36,0	22,1	56,9	84,9	29,9	971,8	21,8	14,3	1,1	347,5	7,5	5,2	6,2	6,6	1,4	147,1	32,5	7,9
nov02	26,7	33,4	21,8	68,1	89,6	41,1	972,9	22,0	18,3	1,1	309,9	6,1	5,6	4,2	7,1	1,6	138,3	92,0	7,3
dez02	28,0	34,1	23,0	68,2	90,0	41,3	972,1	24,2	20,3	1,2	348,4	6,7	5,9	4,6	6,2	1,3	145,4	90,8	8,7
Média	25,6	32,0	20,2	63,7	87,8	37,9	974,3	19,8	13,7	1,0	345,6	6,0	4,5	4,1	6,1	1,4	127,6	1019,8	8,1

ANEXO 3

(RESULTADOS OBTIDOS PARA AS
AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM
ESTUFA CONVENCIONAL A 85°C
APÓS 6, 12, 18 e 30 MESES)

Tabela A.18 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa Convencional a 85°C (6 meses)

Propriedades										
	Escoamento					Ruptura				
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P V C	0.80 L	98	16	20	19	451	174	29	36	1128
	CV (%)	3,2	3,2	3,2	3,2	6,8	10	10	10	6,9
	0.80 T	104	17	22	15	605	166	28	35	1124
	CV (%)	4,5	4,5	4,5	4,5	7,5	6,6	6,6	6,6	6,6
	2.50 L	365	61	24	17	506	521	87	35	1316
	CV (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	9,5	1,9	1,9	1,9	2,4
	2.50 T	369	62	25	18	452	487	81	32	1301
	CV (%)	3,4	3,4	3,4	3,4	6,7	7,1	7,1	7,1	8,4
	1.00 L	-	-	-	-	6,3	105	18	18	508
	CV (%)	-	-	-	-	4,1	1,5	1,5	1,5	3,1
	1.00 T	-	-	-	-	6,4	98	16	16	512
	CV (%)	-	-	-	-	3,4	1,1	1,2	1,2	1,3
	2.00 L	-	-	-	-	5,7	199	33	17	521
	CV (%)	-	-	-	-	2,3	1,2	1,1	1,1	0,4
	2.00 T	-	-	-	-	5,5	171	29	14	521
	CV (%)	-	-	-	-	1,3	3,8	3,8	3,8	3,5

Tabela A.19 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa Convencional a 85°C (12 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	90	15	19	19	395	168	28	35	1129
	CV (%)	3,9	3,9	3,9	3,9	2,8	2,9	2,9	2,9	2,4
	0.80 T	91	15	19	16	473	154	26	32	1107
	CV (%)	8,8	8,8	8,8	8,8	10,5	12	12	12	6,4
	2.50 L	326	54	22	17	376	476	79	32	1084
	CV (%)	0,7	0,7	0,7	0,7	10,8	7,5	7,5	7,5	7,2
	2.50 T	326	54	22	17	357	458	76	30	1072
	CV (%)	0,4	0,4	0,4	0,4	8,9	5,9	5,9	5,9	5,8
	1.00 L	-	-	-	-	7,1	111	18	18	450
	CV (%)	-	-	-	-	3,1	2,1	2,3	2,3	1,4
P V C	1.00 T	-	-	-	-	6,9	102	17	17	435
	CV (%)	-	-	-	-	1,4	2,4	2,1	2,1	3,4
	2.00 L	-	-	-	-	6,5	202	34	17	434
	CV (%)	-	-	-	-	0,8	1,4	1,5	1,5	2,9
	2.00 T	-	-	-	-	6,2	186	31	15	452
	CV (%)	-	-	-	-	1,6	4,1	3,9	3,9	5,9

Tabela A.20 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa Convencional a 85°C (18 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	91	15	19	18	370	146	24	31	1110
	CV (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	5,3	13	13	12,5	10,2
	0.80 T	93	16	19	15	455	149	25	32	1150
	CV (%)	8,5	8,5	8,5	8,5	9,5	10	10	10	5,4
	2.50 L	315	53	21	16	355	450	75	31	1200
	CV (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	11,8	8,5	8,5	8,5	8,2
	2.50 T	323	54	21	16	347	468	78	31	1190
	CV (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	7,9	6,9	6,9	6,9	6,8
	1.00 L	-	-	-	-	10,3	108	18	18	312
	CV (%)	-	-	-	-	35	3,4	3,3	3,3	15
P V C	1.00 T	-	-	-	-	7,4	103	17	17	356
	CV (%)	-	-	-	-	2,4	3,8	3,6	3,6	5,3
	2.00 L	-	-	-	-	7,1	189	31	16	326
	CV (%)	-	-	-	-	5,4	1,8	1,8	1,8	3,5
	2.00 T	-	-	-	-	8,2	175	29	15	274
	CV (%)	-	-	-	-	10,5	1,2	1,1	1,1	4,5

Tabela A.21 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa Convencional a 85°C (30 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	94	16	20	20	441	163	27	34	1087
	CV (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	6,4	14	14	13,6	11,2
	0.80 T	107	18	22	17,5	496	162	27	34	1111
	CV (%)	2,1	2,1	2,1	2,1	3,5	5,7	5,7	5,7	5,9
	2.50 L	328	55	22	17	395	469	78	31	1047
	CV (%)	1,8	1,8	1,8	1,8	8,1	8,4	8,4	8,4	7,4
	2.50 T	333	55	22	17,5	462	454	76	30	1065
	CV (%)	1,3	1,3	1,3	1,3	2,2	9,6	9,6	9,6	8,9
	1.00 L	-	-	-	-	6,9	109	18	18	387
	CV (%)	-	-	-	-	5,7	4,2	4,0	4,0	1,3
P V C	1.00 T	-	-	-	-	6.0	105	18	18	383
	CV (%)	-	-	-	-	4,1	2,4	2,6	2,6	2,4
	2.00 L	-	-	-	-	5,8	197	33	16	370
	CV (%)	-	-	-	-	1,0	3,6	3,8	3,8	5,6
	2.00 T	-	-	-	-	6.0	190	32	16	349
	CV (%)	-	-	-	-	0,3	1,1	1,2	1,2	2,0

Tabela A.22 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras envelhecidas em Estufa Convencional a 85°C (6, 12, 18 e 30 meses)

		Estufa			Estufa			Estufa			Estufa		
		Convencional			Convencional			Convencional			Convencional		
		6 meses			12 meses			18 meses			30 meses		
		Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
e	(mm)	F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F
		(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)
	0,80 L	422	3,3	148	422	3,1	137	421	3,0	130	379	1,9	152
	CV (%)	2,6	14	3,0	0,9	0,6	5,5	1,0	0,6	2,5	0,1	35	1,6
P	0,80 T	-	-	168	-	-	152	-	-	147	-	-	156
	CV (%)	-	-	3,1	-	-	3,8	-	-	3,2	-	-	0,9
E	2,50 L	959	1,3	536	1039	1,3	463	999	1,3	450	1068	1,3	471
	CV (%)	1,6	19	3,9	1,9	2,7	1,1	1,4	0,7	1,5	0,2	2,7	0,3
A	2,50 T	-	-	509	-	-	484	-	-	464	-	-	502
	CV (%)	-	-	4,8	-	-	0,4	-	-	2,0	-	-	0,9
	1,00 L	267	3,0	53	307	2,9	52	328	2,9	48	348	3,0	50
	CV (%)	2,8	2,7	9,0	2,4	0,2	6,4	1,3	2,4	20,2	13	1,3	8,0
P	1,00 T	-	-	49	-	-	51	-	-	49	-	-	49
	CV (%)	-	-	5,6	-	-	0,8	-	-	12,4	-	-	8,0
V	2,00 L	485	3,0	97	518	2,9	97	580	2,8	87	571	3,1	82
	CV (%)	1,5	2,6	3,2	1,5	0,7	8,6	4,2	9,9	7,5	0,4	1,3	1,6
C	2,00 T	-	-	100	-	-	102	-	-	80	-	-	88
	CV (%)	-	-	4,7	-	-	0,7	-	-	8,5	-	-	9,0

ANEXO 4

(RESULTADOS OBTIDOS PARA AS AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO DE AR A 75°C APÓS 1, 2, 3, 6 e 14 MESES)

Tabela A.23 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (1 mês)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	85	14	18	17	457	151	25	31	1049
	CV (%)	3,6	3,6	3,6	3,6	6,6	10	10	10	7,6
	0.80 T	86	14	18	15	528	134	22	28	1052
	CV (%)	1,8	1,8	1,8	1,8	4,8	12	12	12	10,3
	1.00 L	95	16	16	18	328	161	27	27	1019
	CV (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	2,2	2,8	2,8	2,8	1,7
	1.00 T	104	17	17	17	355	179	30	30	1224
	CV (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	4,0	9,0	9,0	9,0	5,9
	1.50 L	139	23	15	17,5	308	296	49	33	1295
	CV (%)	4,8	4,8	4,8	4,8	1,2	1,9	1,9	1,9	1,6
	1.50 T	147	24	16	15	326	280	47	31	1345
	CV (%)	2,4	2,4	2,4	2,4	1,2	0,9	0,9	0,9	1,1
	2.50 L	289	48	19	15	469	431	72	29	1104
	CV (%)	5,7	5,7	5,7	5,7	9,2	8,4	8,4	8,4	4,0
	2.50 T	292	49	19	15	529	336	56	22	910
	CV (%)	1,9	1,9	1,9	1,9	2,6	2,4	2,4	2,4	2,3
P V C	1.00 L	-	-	-	-	7,0	106	18	18	473
	CV (%)	-	-	-	-	2,5	2,4	2,4	2,4	3,3
	1.00 T	-	-	-	-	6,8	99	16	16	472
	CV (%)	-	-	-	-	1,1	1,0	1,0	1,0	1,5
	2.00 L	-	-	-	-	5,9	197	33	16	501
	CV (%)	-	-	-	-	0,3	3,2	3,2	3,2	6,8
	2.00 T	-	-	-	-	5,5	174	29	14	489
	CV (%)	-	-	-	-	1,6	2,6	2,6	2,6	4,5

Tabela A.24 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (2 meses)

	Propriedades									
	Escoamento					Ruptura				
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	92	15	19	19	416	170	28	35	1105
	CV (%)	4,2	4,2	4,2	4,2	9,1	1,1	1,1	1,1	2,5
	0.80 T	97	16	20	17	444	162	27	34	1135
	CV (%)	1,3	1,3	1,3	1,3	7,1	3,1	3,1	3,1	2,6
	1.00 L	98	16	16	18	320	184	31	31	1209
	CV (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	4,1	2,7	2,7	2,7	2,1
	1.00 T	96	16	16	18	317	181	30	30	1274
	CV (%)	2,7	2,7	2,7	2,7	2,2	5,6	5,6	5,6	3,4
	1.50 L	153	26	17	18	324	262	44	29	1183
	CV (%)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,6	5,2	5,2	5,2	4,3
	1.50 T	157	26	17	17,5	353	284	47	32	1306
	CV (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	7,6	2,3	2,3	2,3	2,1
	2.50 L	339	56	23	17,5	454	490	82	33	1068
	CV (%)	3,7	3,7	3,7	3,7	2,3	2,1	2,1	2,1	1,1
	2.50 T	343	57	23	17	343	484	81	32	1091
	CV (%)	5,3	5,3	5,3	5,3	31	8,5	8,5	8,5	11
P V C	1.00 L	-	-	-	-	6,9	113	19	19	487
	CV (%)	-	-	-	-	1,4	1,1	1,3	1,3	3,5
	1.00 T	-	-	-	-	6,9	103	17	17	473
	CV (%)	-	-	-	-	1,3	1,1	1,4	1,4	3,8
	2.00 L	-	-	-	-	5,9	198	33	16	505
	CV (%)	-	-	-	-	2,4	2,6	2,4	2,4	3,4
	2.00 T	-	-	-	-	5,6	175	29	15	483
	CV (%)	-	-	-	-	1,1	4,5	4,5	4,5	6,5

Tabela A.25 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (3 meses)

	Propriedades									
	Escoamento					Ruptura				
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	91	15	19	18	474	164	27	34	1065
	CV (%)	4,5	4,5	4,5	4,5	5,7	3,9	3,9	3,9	2,6
	0.80 T	92	15	19	15	517	152	25	32	1104
	CV (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	2,0	10	10	10	7,4
	1.00 L	102	17	19	18	382	190	32	36	1259
	CV (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	17	0,4	0,4	0,4	1,9
	1.00 T	91	15	15	17,5	346	177	30	30	1310
	CV (%)	2,1	2,1	2,1	2,1	13	1,9	1,9	1,9	0,8
	1.50 L	146	24	16	19	297	275	46	31	1251
	CV (%)	5,4	5,4	5,4	5,4	6,9	4,0	4,0	4,0	1,6
	1.50 T	151	25	17	18	345	258	43	27	1245
	CV (%)	2,3	2,3	2,3	2,3	11	7,3	7,3	7,3	4,3
	2.50 L	279	46	19	16	493	414	69	28	1089
	CV (%)	1,7	1,7	1,7	1,7	3,0	2,5	2,5	2,5	2,4
	2.50 T	283	47	19	15	512	401	67	27	1079
	CV (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	2,8	5,1	5,1	5,1	4,7
P V C	1.00 L	-	-	-	-	6,4	113	19	19	476
	CV (%)	-	-	-	-	2,8	1,8	1,8	1,8	3,2
	1.00 T	-	-	-	-	6,2	102	17	17	468
	CV (%)	-	-	-	-	0,4	2,4	2,4	2,4	4,3
	2.00 L	-	-	-	-	5,4	204	34	17	512
	CV (%)	-	-	-	-	2,5	2,9	2,9	2,9	3,8
	2.00 T	-	-	-	-	5,1	183	31	15	531
	CV (%)	-	-	-	-	0,8	2,3	2,3	2,3	3,4

Tabela A.26 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (6 meses)

	Propriedades									
	Escoamento					Ruptura				
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	90	15	19	20	311	154	26	32	1090
	CV (%)	2,6	2,6	2,6	2,6	1,7	1,0	1,0	1,0	0,03
	0.80 T	94	16	19	18,5	344	152	25	32	1135
	CV (%)	2,8	2,8	2,8	2,8	5,5	4,1	4,1	4,1	2,8
	1.00 L	103	17	17	19	303	197	33	33	1280
	CV (%)	0,6	0,6	0,6	0,6	5,7	1,9	1,9	1,9	0,3
	1.00 T	105	18	18	19	330	163	27	27	1159
	CV (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	8,7	8,7	8,7	7,5
	1.50 L	164	27	18	20	294	269	45	30	1146
	CV (%)	2,7	2,7	2,7	2,7	1,1	1,2	1,2	1,2	0,1
	1.50 T	166	28	18	20	317	281	47	31	1241
	CV (%)	5,2	5,2	5,2	5,2	13,1	12	12	12	7,6
	2.50 L	278	46	19	20	321	422	70	28	1118
	CV (%)	1,7	1,7	1,7	1,7	7,6	0,4	0,4	0,4	1,7
	2.50 T	290	48	19	19	348	404	67	27	1062
	CV (%)	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	6,1	6,1	6,1	5,7
P V C	1.00 L	-	-	-	-	7,0	107	18	18	464
	CV (%)	-	-	-	-	2,3	3,8	3,8	3,8	5,7
	1.00 T	-	-	-	-	7,0	98	16	16	480
	CV (%)	-	-	-	-	7,0	1,4	1,4	1,4	3,0
	2.00 L	-	-	-	-	5,6	205	341	17	515
	CV (%)	-	-	-	-	0,4	1,5	1,5	1,5	1,9
	2.00 T	-	-	-	-	5,3	174	29	15	491
	CV (%)	-	-	-	-	0,4	1,2	1,2	1,2	0,8

Tabela A.27 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (14 meses)

	Propriedades									
	Escoamento					Ruptura				
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	97	16	20	19	429	178	30	37	1148
	CV (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	8,0	7,8	7,8	7,8	5,6
	0.80 T	103	17	21	19	510	163	27	34	1103
	CV (%)	1,1	1,1	1,1	1,1	5,9	7,5	7,5	7,5	6,4
	1.00 L	110	18	18	19	404	206	34	34	1240
	CV (%)	1,1	1,1	1,1	1,1	11	1,9	1,9	1,9	0,9
	1.00 T	112	19	19	19	395	175	29	29	1165
	CV (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	10	2,2	2,2	2,2	0,9
	1.50 L	168	28	19	19	342	294	49	33	1246
	CV (%)	1,7	1,7	1,7	1,7	13,5	2,0	2,0	2,0	1,9
	1.50 T	163	27	18	19	408	295	49	33	1294
	CV (%)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,05	1,3	1,3	1,3	1,0
	2.50 L	296	49	20	19	421	412	69	27	1034
	CV (%)	2,7	2,7	2,7	2,7	1,6	11	11	11	7,9
	2.50 T	304	51	20	19	400	454	76	30	1116
	CV (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	6,0	12	12	12	10
P V C	1.00 L	-	-	-	-	9,6	117	20	20	443
	CV (%)	-	-	-	-	9,9	2,8	2,8	2,8	4,3
	1.00 T	-	-	-	-	11,4	107	18	18	431
	CV (%)	-	-	-	-	20	3,2	3,2	3,2	9,7
	2.00 L	-	-	-	-	5,9	219	37	37	485
	CV (%)	-	-	-	-	0,4	1,7	1,7	1,7	0,7
	2.00 T	-	-	-	-	5,9	195	33	33	478
	CV (%)	-	-	-	-	4,0	1,9	1,9	1,9	4,3

Tabela A.28 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (1, 2 e 3 meses)

e (mm)	Estufa com Circulação de ar 1 mês			Estufa com Circulação de ar 2 meses			Estufa com Circulação de ar 3 meses		
	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
	F	δ	F	F	δ	F	F	δ	F
	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)
0,80 L	401	2,6	140	434	2,8	142	420	2,9	137
CV (%)	0,6	1,9	7,8	1,8	2,5	6,0	2,2	2,5	1,5
0,80 T	-	-	137	-	-	160	-	-	137
CV (%)	-	-	3,4	-	-	4,9	-	-	4,0
1.00 L	440	2,7	139	435	2,9	150	409	2,2	140
CV (%)	1,0	2,7	5,5	0,9	8,2	1,5	3,3	9,5	1,3
P 1.00 T	-	-	152	-	-	151	-	-	149
E CV (%)	-	-	2,5	-	-	4,3	-	-	0,6
A 1.50 L	597	2,4	213	627	2,5	227	620	2,4	218
D CV (%)	1,4	7,0	1,0	1,3	4,9	1,2	0,5	2,2	2,2
1.50 T	-	-	228	-	-	235	-	-	229
CV (%)	-	-	1,1	-	-	1,1	-	-	1,7
2,50 L	954	1,3	425	1026	1,3	528	936	1,3	409
CV (%)	1,2	0,0	5,3	1,7	2,7	0,4	0,8	0,9	3,5
2,50 T	-	-	439	-	-	570	-	-	413
CV (%)	-	-	0,7	-	-	2,3	-	-	1,4
1,00 L	294	2,9	55	300	3,1	49	328	3,1	57
CV (%)	1,6	1,2	4,2	4,8	9,4	5,8	1,9	2,4	4,9
1,00 T	-	-	54	-	-	53	-	-	56
CV (%)	-	-	6,5	-	-	5,9	-	-	8,3
P 2,00 L	490	2,9	93	488	2,9	98	535	3,2	96
V CV (%)	0,2	4,2	2,0	0,2	1,0	3,4	0,1	4,6	4,4
C 2,00 T	-	-	101	-	-	105	-	-	98
CV (%)	-	-	1,1	-	-	5,5	-	-	2,7

Tabela A.29 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras envelhecidas em Estufa com Circulação de Ar a 75°C (6 e 14 meses)

e	(mm)	Estufa com Circulação de ar 6 meses			Estufa com Circulação de ar 14 meses		
		Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
		F	δ	F	F	δ	F
		(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)
P E A D	0,80 L	399	2,9	140	446	3,0	133
	CV (%)	0,01	1,8	3,1	2,5	3,0	0,9
	0,80 T	-	-	148	-	-	155
	CV (%)	-	-	3,5	-	-	0,7
	1.00 L	440	2,7	162	462	3,0	159
	CV (%)	2,7	11	2,7	1,2	10	3,3
	1.00 T	-	-	170	-	-	162
	CV (%)	-	-	0,2	-	-	2,9
	1.50 L	605	2,1	242	612	2,4	225
	CV (%)	0,4	3,3	0,5	0,1	2,0	0,4
	1.50 T	-	-	249	-	-	233
	CV (%)	-	-	0,6	-	-	1,0
	2,50 L	945	1,3	403	963	1,3	397
	CV (%)	2,2	1,8	1,0	2,0	1,8	0,9
	2,50 T	-	-	411	-	-	415
	CV (%)	-	-	2,7	-	-	1,0
P V C	1,00 L	311	2,5	56	336	3,0	62
	CV (%)	1,9	4,3	6,2	2,6	3,7	4,7
	1,00 T	-	-	66	-	-	66
	CV (%)	-	-	4,7	-	-	6,6
	2,00 L	498	2,8	97	506	2,9	102
	CV (%)	2,0	0,7	2,5	2,0	4,3	5,7
	2,00 T	-	-	109	-	-	110
	CV (%)	-	-	3,6	-	-	1,0

ANEXO 5

(RESULTADOS OBTIDOS PARA AS AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM BANHO TÉRMICO COM ÁGUA A 65°C e 85°C APÓS 6 MESES E PARA AS AMOSTRAS ENVELHECIDAS EM CONTATO COM O NIÓBIO A 50°C)

Tabela A.30 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Banho Térmico com água a 65°C (6 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	88	15	18	20	330	157	26	33	1214
	CV (%)	2,0	2,0	2,0	2,0	1,4	3,6	3,6	3,6	1,6
	0.80 T	96	16	20	17	356	141	23	29	1119
	CV (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	4,3	12	12	12	12
	2.50 L	313	52	21	18	308	470	78	31	1106
	CV (%)	0,9	0,9	0,9	0,9	2,1	0,7	0,7	0,7	2,7
	2.50 T	330	55	22	18	314	473	79	32	1130
	CV (%)	0,2	0,2	0,2	0,2	9,6	0,6	0,6	0,6	0,5
	1.00 L	-	-	-	-	6,3	101	17	17	477
	CV (%)	-	-	-	-	3,1	0,6	1,0	1,0	0,3
P V C	1.00 T	-	-	-	-	6,3	95	16	16	495
	CV (%)	-	-	-	-	2,0	1,9	1,9	1,9	2,9
	2.00 L	-	-	-	-	5,2	183	31	15	486
	CV (%)	-	-	-	-	1,0	3,7	3,1	3,1	1,2
	2.00 T	-	-	-	-	5,0	163	27	14	498
	CV (%)	-	-	-	-	0,6	2,0	1,8	1,8	0,4

Tabela A.31 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas em Banho Térmico com água a 85°C (6 meses)

Propriedades										
	e (mm)	Escoamento					Ruptura			
		F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	87	15	18	20	382	162	27	34	1173
	CV (%)	3,8	3,8	3,8	3,8	5,3	10	10	10	7,7
	0.80 T	89	15	19	18	427	121	20	25	1031
	CV (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	17	2,5	2,5	2,5	1,8
	2.50 L	297	49	20	18	292	471	78	31	1378
	CV (%)	4,4	4,4	4,4	4,4	5,7	5,3	5,3	5,3	4,3
	2.50 T	322	54	21	18	397	466	77	31	1366
	CV (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,9	4,0	4,0	4,0	1,8
	1.00 L	-	-	-	-	6,5	101	17	17	475
	CV (%)	-	-	-	-	0,5	7,1	7,3	7,3	11
P V C	1.00 T	-	-	-	-	6,4	92	15	15	449
	CV (%)	-	-	-	-	0,8	2,9	2,8	2,8	3,0
	2.00 L	-	-	-	-	6,3	187	33	16	478
	CV (%)	-	-	-	-	1,2	11	1,5	1,5	2,0
	2.00 T	-	-	-	-	5,8	161	28	14	474
	CV (%)	-	-	-	-	2,1	11	0,9	0,9	1,3

Tabela A.32 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC no ensaio de Compatibilidade Química com o Nióbio a 50°C (7 meses)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	89	15	19	17	404	164	27	34	1105
	CV (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	7,2	12	12	12	9,5
	0.80 T	95	16	20	16	461	153	26	32	1103
	CV (%)	0,7	0,7	0,7	0,7	15	13	13	13	11
	2.50 L	272	45	18	17	284	400	67	27	1074
	CV (%)	0,4	0,4	0,4	0,4	4,4	14	14	14	14
	2.50 T	282	47	19	17	324	365	61	24	998
	CV (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	3,4	16	16	16	17
	1.00 L	-	-	-	-	7,6	107	18	18	454
	CV (%)	-	-	-	-	3,6	2,3	2,3	2,3	3,0
P V C	1.00 T	-	-	-	-	7,6	99	17	17	467
	CV (%)	-	-	-	-	4,7	2,8	2,5	2,5	3,7
	2.00 L	-	-	-	-	6,5	204	34	17	478
	CV (%)	-	-	-	-	1,2	2,3	2,3	2,3	4,2
	2.00 T	-	-	-	-	6,2	175	29	15	475
	CV (%)	-	-	-	-	0,9	1,9	1,9	1,9	3,0

Tabela A.33 – Resultados de ensaios de Punção e Rasgo para amostras envelhecidas em água a 65°C e 85°C (6 meses) e em contato com o Nióbio a 50°C (7 meses)

	e (mm)	Banho Térmico em Água a 65°C 6 meses			Banho Térmico em Água a 85°C 6 meses			Compatibilidade Química (Nióbio) a 50°C - 7 meses		
		Punção		Rasgo	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
		F (N)	δ (cm)	F (N)	F (N)	δ (cm)	F (N)	F (N)	δ (cm)	F (N)
P	0,80 L	361	2,6	133	408	3,2	128	390	2,7	128
	CV (%)	0,1	3,4	0,8	0,8	3,3	0,7	2,8	0,7	1,4
	0,80 T	-	-	136	-	-	134	-	-	131
	CV (%)	-	-	2,5	-	-	1,1	-	-	0,8
A	2,50 L	968	1,3	424	923	1,3	423	866	1,4	381
	CV (%)	1,4	0,9	0,6	1,5	0,9	4,2	0,2	1,7	0,4
	2,50 T	-	-	447	-	-	429	-	-	389
	CV (%)	-	-	0,4	-	-	1,0	-	-	2,2
P	1,00 L	261	3,0	55	334	3,1	53	259	3,2	53
	CV (%)	2,6	16	2,1	4,0	1,3	7,1	2,2	13	11
	1,00 T	-	-	55	-	-	53	-	-	56
	CV (%)	-	-	7,6	-	-	5,1	-	-	5,4
C	2,00 L	400	2,7	93	536	2,8	102	408	2,7	97
	CV (%)	2,4	1,3	0,9	3,5	3,4	3,4	0,1	2,4	1,3
	2,00 T	-	-	96	-	-	107	-	-	101
	CV (%)	-	-	0,9	-	-	3,8	-	-	3,3

ANEXO 6

(RESULTADOS OBTIDOS PARA AS
AMOSTRAS EXPOSTAS À
RADIAÇÃO UV A 60°C e
PROCESSO DE CONDENSAÇÃO A
50°C APÓS 45 DIAS E 6 MESES

Tabela A.34 – Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas simultaneamente com Radiação UV (60°C) e Condensação a 50°C (45 dias)

	Propriedades									
	Escoamento						Ruptura			
	e (mm)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	0.80 L	82	14	17	14	500	151	25	31	1046
	CV (%)	3,6	3,6	3,6	3,6	4,2	13	13	13	13,4
	0.80 T	93	16	19	13	529	153	25	32	1087
	CV (%)	3,2	3,2	3,2	3,2	0,4	7,8	7,8	7,8	7,9
	2.50 L	270	45	18	15	430	435	73	29	1100
	CV (%)	2,8	2,8	2,8	2,8	4,5	3,0	3,0	3,0	4,0
	2.50 T	300	50	20	14	400	450	75	30	1040
	CV (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	3,8	2,6	2,6	2,6	3,7
P V C	1.00 L	-	-	-	-	4,7	98	16	16	527
	CV (%)	-	-	-	-	0,7	1,5	1,6	1,6	1,3
	1.00 T	-	-	-	-	4,3	86	14	14	528
	CV (%)	-	-	-	-	0,5	2,6	2,9	2,9	2,9
	2.00 L	-	-	-	-	5,0	205	34	17	520
	CV (%)	-	-	-	-	0,6	2,3	2,0	2,0	2,0
	2.00 T	-	-	-	-	5,0	174	29	14	510
	CV (%)	-	-	-	-	1,0	1,5	3,0	3,0	3,0

Tabela A.35 - Resultados dos ensaios de tração para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas simultaneamente com Radiação UV (60°C) e Condensação a 50°C (6 meses)

	Propriedades									
	e	Escoamento					Ruptura			
		F	F/Larg	σ	ε	E	F	F/Larg	σ	ε
	(mm)	(N)	(N/mm)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N)	(N/mm)	(MPa)	(%)
P E A D	0.80 L	88	15	18	19	433	162	27	34	1093
	CV (%)	0,6	0,6	0,6	0,6	2,1	14	14	14	10
	0.80 T	90	15	19	15	501	147	14	31	1096
	CV (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	10	10	10	10	8,7
	1.00 L	103	17	17	17	434	195	32	32	1243
	CV (%)	5,1	5,1	5,1	5,1	3,4	6,0	6,0	6,0	6,6
	1.00 T	108	18	18	15	472	184	31	31	1222
	CV (%)	3,2	3,2	3,2	3,2	0,5	6,3	6,3	6,3	4,8
	1.50 L	153	25	17	17,5	366	292	49	32	1208
	CV (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	9,1	7,2	7,2	7,2	5,9
	1.50 T	160	27	18	15	403	293	49	33	1331
	CV (%)	2,8	2,8	2,8	2,8	16	5,8	5,8	5,8	5,3
	2.50 L	304	51	20	17	385	426	71	28	1046
	CV (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	8,0	8,0	8,0	8,6
	2.50 T	304	51	20	15	435	447	74	30	1136
	CV (%)	1,7	1,7	1,7	1,7	13	1,6	1,6	1,6	1,1
P V C	1.00 L	-	-	-	-	7,2	106	18	18	456
	CV (%)	-	-	-	-	3,0	0,4	0,4	0,4	0,4
	1.00 T	-	-	-	-	7,4	100	17	17	478
	CV (%)	-	-	-	-	3,6	0,8	0,8	0,8	1,8
	2.00 L	-	-	-	-	5,9	206	34	17	502
	CV (%)	-	-	-	-	1,1	0,3	0,3	0,3	1,3
	2.00 T	-	-	-	-	5,7	177	30	15	483
	CV (%)	-	-	-	-	7,8	1,2	1,2	1,2	1,9

Tabela A.36 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para as amostras de PEAD e PVC envelhecidas simultaneamente com Radiação UV (60°C) e Condensação a 50°C (45 dias e 6 meses)

		UV e Condensação 45 dias			UV e Condensação 6 meses		
	e (mm)	Punção		Rasgo	Punção		Rasgo
		F	δ	F	F	δ	F
		(N)	(cm)	(N)	(N)	(cm)	(N)
P E A D	0,80 L	405	2,8	128	384	2,7	122
	CV (%)	0,1	1,3	3,2	0,8	0,6	6,0
	0,80 T	-	-	131	-	-	134
	CV (%)	-	-	2,7	-	-	2,3
	1.00 L	-	-	-	434	2,8	155
	CV (%)	-	-	-	1,0	5,7	0,4
	1.00 T	-	-	-	-	-	159
	CV (%)	-	-	-	-	-	0,9
	1.50 L	-	-	-	582	2,2	226
	CV (%)	-	-	-	1,1	2,7	0,4
	1.50 T	-	-	-	-	-	237
	CV (%)	-	-	-	-	-	0,6
	2,50 L	911	1,3	339	943	1,4	391
	CV (%)	3,0	2,5	2,3	0,9	0,0	0,6
	2,50 T	-	-	349	-	-	416
	CV (%)	-	-	1,5	-	-	0,1
P V C	1,00 L	283	3,9	39	269	2,9	57
	CV (%)	2,0	0,3	13,3	0,9	9,1	1,0
	1,00 T	-	-	40	-	-	58
	CV (%)	-	-	3,2	-	-	4,3
	2,00 L	495	2,5	92	456	2,9	97
	CV (%)	1,5	3,0	3,0	0,8	1,8	10
	2,00 T	-	-	96	-	-	108
	CV (%)	-	-	2,8	-	-	11

Tabela A.37 – Resultados dos ensaios de tração para a amostra de PEAD Branca Texturizada (Intacta)

Propriedades										
		Escoamento					Ruptura			
		F	F/Larg	σ	ε	E	F	F/Larg	σ	ε
P	e (mm)	(N)	(N/mm)	(MPa)	(%)	(MPa)	(N)	(N/mm)	(MPa)	(%)
E	1,00 L	105	18	18	16	350	115	19	19	300
A	CV (%)	17	17	17	17	26	6,0	6,0	6,0	14
D	1,00 T	99	17	17	12	418	105	18	18	300
	CV (%)	4,6	4,6	4,6	4,6	9,3	3,7	3,7	3,7	3,0

Tabela A.38 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para a amostra de PEAD Branca Texturizada (Intacta)

UV e Condensação 6 meses				
	e (mm)	Punção		Rasgo
		F (N)	δ (cm)	F (N)
P	1,00 L	419	1,9	179
E	CV (%)	5,0	6,0	13
A	1,00 T	-	-	171
D	CV (%)	-	-	5,5

Tabela A.39 – Resultados dos ensaios de tração para a amostra de PEAD Branca Texturizada envelhecida simultaneamente com Radiação UV (60°C) e Condensação a 50°C (6 meses)

Propriedades										
	e (mm)	Escoamento					Ruptura			
		F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)	F (N)	F/Larg (N/mm)	σ (MPa)	ε (%)
P E A D	1,00 L	124	21	21	15	315	130	22	22	200
	CV (%)	3,9	3,9	3,9	3,9	1,5	6,6	6,6	6,6	5,2
	1,00 T	110	18	18	12	478	122	20	20	130
	CV (%)	13	13	13	13	21	0,9	0,9	0,9	8,5

Tabela A.40 – Resultados dos ensaios de Punção e Rasgo para a amostra de PEAD Branca Texturizada envelhecida simultaneamente com Radiação UV (60°C) e Condensação a 50°C (6 meses)

UV e Condensação 6 meses				
	e (mm)	Punção		Rasgo
		F (N)	δ (cm)	F (N)
P	1,00 L	423	1,6	184
E	CV (%)	5,3	6,0	5,0
A	1,00 T	-	-	205
D	CV (%)	-	-	4,6