

USP

Campus de São Carlos

INFLUÊNCIA DE ALGUNS AGENTES DE
DEGRADAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS
E MECÂNICAS DE GEOMEMBRANAS

AUTOR: IRAHY SIMÕES MAIA

ORIENTADOR: PROF. DR. ORENCIO MONJE VILAR

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

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

INFLUÊNCIA DE ALGUNS AGENTES DE DEGRADAÇÃO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE
GEOMEMBRANAS

Irahy Simões Maia

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 27.1.03.1.02.....
Ass.: *Guilherme*.....

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Geotecnia.



ORIENTADOR: Orêncio Moje Vilar

São Carlos

2001

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036912

Class.	TESE - EESC
Cult.	3257 ✓
Tombo	T0071/02

de K37520

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M217i Maia, Irahya Simões
Influência de alguns agentes de degradação nas
propriedades físicas e mecânicas de geomembranas /
Irahya Simões Maia. -- São Carlos, 2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.

Área: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Orêncio Moje Vilar.

1. Aterro sanitário. 2. Impermeabilização.
3. Geomembrana. 4. Degradação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

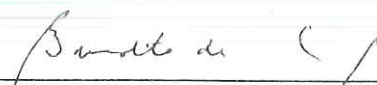
Candidata: Engenheira **IRAHY SIMÕES MAIA**

Dissertação defendida e julgada em 02-10-2001 perante a Comissão Julgadora:



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

Aprovada



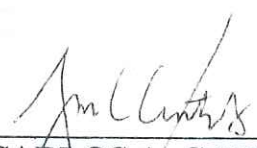
Prof. Assoc. **BENEDITO DE SOUZA BUENO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada



Engenheira **INDIARA GIUGNI VIDAL**
(Especialista da Nortene Plásticos Ltda.)

Aprovada



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

*“A minha mãe, Maria Zélia,
minha grande amiga e incentivadora, e a
meu querido pai, José Fernandes, por
tolerar mais este tempo de saudade”.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr Orêncio Monje Vilar pela excelente orientação, amizade e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Dr Benedito Bueno de Souza e Dr Lázaro Valentin Zuquette pelas inúmeras dúvidas esclarecidas e pelos materiais cedidos durante o desenvolvimento dessa dissertação.

Aos demais professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos pelos ensinamentos recebidos.

A todos os funcionários do departamento, em especial ao Erivelto, e aos técnicos dos laboratórios de geotecnia, Seu Antônio, José Luiz, Oscar, Silvio, Dito, e Décio pelos serviços prestados e principalmente pela boa convivência.

Ao Engenheiro Dr Afonso Marques, pela colaboração e pelo incentivo no encaminhamento desta pesquisa.

Aos Engenheiros Luís Sérgio Akira Kaimoto e Sílvio Luís de Andrade pelo apoio durante a coleta de amostras no Aterro Experimental Bandeirantes.

Ao Engenheiro Roberto Aramaki, pelo material cedido para elaboração da revisão bibliográfica.

Ao professor Dr Aldo Job e demais professores do Departamento de Física da UNESP de Presidente Prudente, por viabilizarem a realização dos ensaios térmicos.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas de Ouro Preto, em especial à Professora Dra Cristiane de Lira Nogueira, aos Professores Dr Romero César Gomes e Dr Luís Gonzaga de Araújo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A todos os colegas do Departamento de Geotecnia, em especial ao Sidnei, Adilson, Luiz, Paulo Lodi e Ana Carina pelas discussões e dúvidas esclarecidas no decorrer do trabalho.

A Ezilma, Muro, Valéria, Monique, Sandra e Silvana, pela amizade e compreensão. Agradeço especialmente a Ezilma, pela recepção e ajuda na minha chegada à São Carlos.

A todos os amigos, aos novos de São Carlos e aos mais antigos, pelo carinho e apoio.

A Antônio Augusto, a Tia Oralda e meu primo Vitinho pela ajuda durante mais estes dois anos fora. Em especial a Carmelita, pelo carinho e dedicação à minha família.

Agradeço em especial, a minha mãe, a meu pai e a meu irmão Marcinho, pela confiança, incentivo e paciência, sem o quais não seria possível obter mais esta conquista.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Conceitos Gerais.....	5
2.3 Impermeabilização.....	8
2.4 Materiais Geossintéticos.....	14
2.4.1 Introdução.....	14
2.4.2 Tipos de geossintéticos e suas aplicações.....	15
2.4.3 Uma breve apresentação dos materiais poliméricos.....	21
2.4.3.1 Introdução.....	21
2.4.3.2 Peso molecular dos polímeros.....	22
2.4.3.3 Classificação dos polímeros.....	25
2.4.3.4 Cristalinidade em polímeros.....	27
2.4.3.5 Transições térmicas nos materiais poliméricos.....	28
2.4.3.6 Temperatura de transição vítrea (Tg).....	28
2.4.3.7 Temperatura de fusão cristalina (Tm).....	29
2.5. Geomembranas.....	30
2.5.1 Introdução.....	30
2.5.2 Tipos de geomembranas e aplicações.....	30
2.6. Propriedades das geomembranas e respectivos ensaios de Laboratório.....	32
2.6.1 Ensaio de identificação.....	33
2.6.1.1 Espessura.....	33
2.6.1.2 Densidade.....	33
2.6.1.3 Massa por unidade de área.....	35
2.6.1.4 Comportamento em solicitações de tração.....	35
2.6.1.5 Flexibilidade a baixa temperatura.....	43
2.6.1.6 Espectroscopia infra-vermelho (IR).....	44
2.6.1.7 Análise Termo-Diferencial (DSC).....	45
2.6.1.8 Análise termogravimétrica (TGA).....	48
2.6.1.9 Análise termomecânica (TMA).....	50

2.6.1.10 Cromatografia.....	50
2.6.1.11 Índice de fusão (ou fluidez) (MI) e Valor K.....	51
2.6.1.12 Extraíveis (<i>Extractables</i>).....	52
2.6.1.13 ASH (cinzas).....	52
2.6.1.14 Dureza.....	53
2.6.1.15 Teor de negro de fumo (principalmente para o HDPE).....	54
2.6.1.16 Dispersão de negro de fumo (geralmente para HDPE).....	54
2.7 Ensaio de caracterização.....	54
2.7.1 Ensaio de caracterização de geomembranas.....	55
2.7.1.1 Resistência ao Rasgo.....	55
2.7.1.2 Estouro.....	56
2.7.1.3 Resistência à Punção.....	58
2.7.1.4 Aderência.....	60
2.7.1.5 Fluência (<i>Creep</i>).....	63
2.7.1.6 Expansão térmica.....	64
2.7.1.7 Estabilidade dimensional.....	65
2.7.1.8 Ensaio de permeabilidade da água.....	65
2.7.1.9 Ensaio de permeabilidade de vapor.....	66
2.8 Ensaio de Durabilidade.....	67
2.8.1 Voláteis.....	68
2.8.2 Abrasão.....	68
2.8.3 Envelhecimento térmico.....	69
2.8.4 Exposição à luz.....	70
2.8.5 Resistência biológica.....	71
2.8.6 Envelhecimento por SO ₂ (para geomembrana de PVC).....	72
2.8.7 Envelhecimento por ozônio (para geomembranas elastoméricas).....	72
2.7.8 “ <i>Stress-cracking</i> ”(para geomembranas de HDPE).....	72
2.8.9 Resistência química.....	73
2.8.10 Oxidação.....	79
2.9. Resultados de Estudos Realizados em Geomembranas.....	80
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
3.1 Materiais utilizados.....	88
3.1.1 Geomembranas.....	88
3.1.2 Amostras submetidas ao envelhecimento natural.....	88
3.1.3 Amostras envelhecidas em laboratório.....	89

3.2 Amostragem.....	91
3.2.1 Aterro Experimental Bandeirantes.....	91
3.2.2 Aterro de Resíduo Classe I.....	95
3.3 Ensaio realizados.....	96
3.3.1 Descrição dos ensaios realizados.....	97
3.3.1.1 Ensaio de tração.....	97
3.3.1.2. Ensaio de rasgo.....	98
3.3.1.3 Ensaio de punção.....	99
3.3.1.4 Análise Termo-Diferencial (DSC).....	100
3.3.1.5 Análise Termogravimétrica (TGA).....	100
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	102
4.1- Amostras virgens.....	102
4.2 Aterro Experimental Bandeirantes.....	116
4.3 Comparação entre as amostras virgens e as amostras retiradas do sistema de impermeabilização do aterro sanitário classe I.....	123
4.4. Comparação entre as amostras virgens e as amostras expostas à temperatura de 75 °C em estufa.....	126
4.5. Comparação entre as amostras virgens e as amostras imersas em óleo diesel e gasolina.....	142
4.6. Comparação entre as amostras virgens e as amostras levadas à lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	157
5. CONCLUSÃO.....	164
5.1 Amostras submetidas ao envelhecimento natural.....	164
5.2 Amostras envelhecidas em laboratório.....	164
5.3 Ensaio térmicos.....	165
Capítulo 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1. Estrutura de um aterro sanitário (ENGEORPS, 1996).....	5
Figura 2.2. Sistema de impermeabilização recomendado pela USEPA (<i>Environmental Protection Agency</i> – USA), (KOERNER & FAHMY, 1995).....	10
Figura 2.3. Sistema de cobertura final mínimo segundo diferentes recomendações e regulamentações (MANASSERO et al., 1998).....	11
Figura 2.4. Sistemas de impermeabilização da base de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de acordo com diferentes recomendaçãoe (MANASSERO et al., 1998).....	12
Figura 2.5. Esquema de aterros para resíduos classe II, $L \geq 3.0m$ e $k \leq 10^{-6}$ cm/s (CETESB 1993).....	13
Figura 2.6. Esquema de aterro para resíduos classe II, $L \geq 1,50m$ e $K \leq 10^{-4}$ cm/s (CETESB 1993).....	14
Figura 2.7. Configurações de tipos de GCL (DANIEL, 1996).....	16
Figura 2.8. Tipos de GCL, (DANIEL, 1996).....	17
Figura 2.9. Emendas de GCL's – Seções típicas, (DANIEL, 1996).....	18
Figura 2.10. Exemplos de monômeros comuns que formam polímeros de adição, representações usuais simplificadas, (AGNELLI, 1992).....	24
Figura 2.11. Comportamento tensão-deformação de diferentes tipos de geomembranas, (RIGO & CAZZUFFI, 1991).....	36
Figura 2.12. Amostras na forma “ <i>dumbbell</i> ”, tipos M-I, M-II e M-III, de acordo com a ASTM D 638.....	37
Figura 2.13. Resultados do ensaio de tração para várias geomembranas de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2.9, (KOERNER, 1997).....	39
Figura 2.14. Resultados do ensaio de tração em amostras (faixa larga) de geomembranas de largura uniforme de 200mm de acordo com ASTM D 4885, (KOERNER, 1997).....	40
Figura 2.15. Diagrama esquemático do aparelho do ensaio de tração axi-simétrico, (KOERNER, 1997).....	42

Figura 2.16. Curva tensão-deformação para vários tipos de geomembranas sob pressão hidrostática axi-simétrica, (KOERNER 1997).....	43
Figura 2.17. Diagrama qualitativo do ensaio DSC, (RIGO & CAZZUFFI, 1991).....	45
Figura 2.18. DSC termograma para geomembranas de HDPE, (HALSE & RIGO, 1994).....	46
Figura 2.19. DSC termograma para geomembranas de VLDE, (HALSE & RIGO, 1994).....	47
Figura 2.20. DSC termograma para geomembrana de PVC, (HALSE & RIGO, 1994).....	47
Figura 2.21. TGA - termograma para geomembranas de HDPE e VLDPE sob velocidade de aquecimento de 20 °C/min, (HALSE & RIGO, 1991).....	49
Figura 2.22. TGA - Termograma para geomembranas de PVC, (HALSE & RIGO, 1991).....	49
Figura 2.23. Indentadores para ensaio de dureza, de acordo com a ASTM D 2240.....	53
Figura 2.24. Aparato utilizado no ensaio de resistência ao estouro usado na Escola Politécnica de Montreal (ROLLIN et al., 1984).....	56
Figura 2.25. Resultados do ensaio à punção em várias geomembranas de HDPE e em geomembranas de HDPE combinadas a geotêxteis (KOERNER, 1997).....	59
Figura 2.26. Mecanismos de deformação de geomembranas sob carga pontual (SPRAQUE & FROBEL, 1990).....	60
Figura 2.27. Tipos de aparelhos de ensaios de cisalhamento direto.....	61
Figura 2.28. Tipos de comportamento de creep (RIGO & CAFFUZZI, 1994).....	63
Figura 2.29. Esquema do equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade (RIGO & CAFFUZZI, 1991).....	66
Figura 2.30. Esquema do aparelho utilizado no ensaio de permeabilidade(RIGO & CAFFUZZI, 1994).....	67
Figura 2.31. Ensaio de abrasão em geomembranas (CAZZUFFI, 1983).....	69
Figura 2.32. Esquema do compartimento de incubação para análise do comportamento de resistência química das geomembranas (KOERNER, 1997).....	76
Figura 2.33. Comportamento de amostras de HDPE imergidas em percolados de aterro sanitário a 50°C por 120 dias (KOERNER, 1997).....	77

Capítulo 3

Figura 3.1. Amostras de PVC de 1,0 e 2,0 mm e de HDPE de 1,0 e 1,5 mm expostas à temperatura de 75 °C em estufa sem circulação de ar.....	90
Figura 3.2. Grade de madeira, para fixação das geomembranas imersas em gasolina e óleo diesel, de forma que as amostras não estivessem em contato umas com as outras.....	91
Figura 3.3. Inclinação dos taludes das valas abertas para amostragem das geomembranas...	92
Figura 3.4. Lixo retirado da Cava E ₁ , impermeabilizada com geomembrana de PVC.....	93
Figura 3.5. Lixo retirado da Cava E ₂ , impermeabilizada com geomembrana de HDPE.....	94
Figura 3.6. Geomembrana de HDPE, estufada devido à presença de gás.....	94
Figura 3.7. Molde biselado utilizado para obtenção dos corpos de prova para o ensaio de tração.....	98
Figura 3.8. Forma da amostra do ensaio ao rasgo de acordo com ASTM D 1004.	98
Figura 3.9. Molde biselado utilizado para obtenção dos corpos de prova para o ensaio de rasgo, de acordo com a ASTM D 1004.....	99
Figura 3.10. Equipamento utilizado no ensaio de punção, segundo a norma da ASTM D 1004.....	99

Capítulo 4

Figura 4.1. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 mm do lote I, nas duas direções ensaiadas.....	103
Figura 4.2. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de PVC de 2,0 mm do lote I, nas duas direções ensaiadas.....	103
Figura 4.3. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0mm do lote I, nas duas direções ensaiadas.....	104
Figura 4.4. Gráfico força <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de PVC de 2,0 mm, do lote I, nas duas direções ensaiadas.....	104
Figura 4.5. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm, do lote I.....	104
Figura 4.6. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de PVC de 1,0 mm do lote II, nas duas direções ensaiadas.....	105

Figura 4.7. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de PVC de 2,0 mm, do lote II, nas duas direções ensaiadas.....	105
Figura 4.8. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 mm, do lote II, nas duas direções ensaiadas.....	106
Figura 4.9. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de PVC de 2,0 mm, do lote II, nas duas direções ensaiadas.....	106
Figura 4.10. Gráfico tensão <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm, do lote II.....	106
Figura 4.11. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “A”, nas duas direções ensaiadas.....	107
Figura 4.12. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “A”, nas duas direções ensaiadas.....	107
Figura 4.13. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “A”, nas duas direções ensaiadas.....	108
Figura 4.14. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “A”, nas duas direções ensaiadas.....	108
Figura 4.15. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “A”.....	108
Figura 4.16. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de HDPE de 1,0mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.....	109
Figura 4.17. Gráfico tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.....	109
Figura 4.18. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.....	110
Figura 4.19. Gráfico força <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.....	110
Figura 4.20. Gráfico tensão <i>versus</i> deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “B”.....	110
Figura 4.21. Resistência à tração: amostras virgens de HDPE cedidas pelos fabricantes “A” e “B”.....	111

Figura 4.22. Deformação na ruptura: amostras virgens de HDPE cedidas pelos fabricantes “A” e “B”	112
Figura 4.23. Módulo de elasticidade: amostras virgens de HDPE cedidas pelos fabricantes “A” e “B”	112
Figura 4.24. Gráfico obtido no ensaio de DSC, realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “A”	113
Figura 4.25. Gráfico obtido no ensaio de DSC, realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “B”	113
Figura 4.26. Ensaio de TGA. PVC 1,0 mm, amostra virgem.....	115
Figura 4.27. Ensaio de TGA. PVC 2,0 mm, amostra virgem.....	115
Figura 4.28. Resistência à tração: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.....	118
Figura 4.29. Deformação na ruptura: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.....	118
Figura 4.30. Módulo de elasticidade: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.....	119
Figura 4.31. Curva tensão-deformação: comparação entre as amostras de PVC de 1,0 mm virgens e as amostras retiradas do Aterro Experimental nas duas direções ensaiadas.....	119
Figura 4.32. Resistência ao rasgo: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.....	120
Figura 4.33. Resistência ao puncionamento: amostras virgens comparadas às retiradas do aterro experimental.....	120
Figura 4.34. Deflexão na ruptura: amostras virgens comparadas às do aterro experimental.	121
Figura 4.35. Ensaio de TGA. Amostra virgem e PVC comparada à amostra retirada do Aterro Experimental.....	121
Figura 4.36. Ensaio de TGA. Amostras texturizadas de PVC de 1,0 mm virgem e retirada do Aterro Classe I.	125
Figura 4.37. Variação da espessura em função do tempo de exposição em estufa à temperatura de 75 °C.....	128.

Figura 4.38. Geomembrana de HDPE comparada à amostra de PVC ambas retiradas da estufa após 9 meses de exposição à temperatura de 75 °C.....	128
Figura 4.39. Variação da resistência à tração na ruptura com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.....	130
Figura 4.40. Variação da deformação na ruptura com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.....	131
Figura 4.41. Variação do módulo de elasticidade com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.....	132
Figura 4.42. Variação da resistência ao rasgo com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.....	133
Figura 4.43. Variação da resistência ao puncionamento com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.....	133
Figura 4.44. Variação da deflexão na ruptura com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.....	134
Figura 4.45. Variação da resistência à tração: amostras virgens do fabricante “B” comparadas às retiradas da estufa a 75 °C após 3 meses.....	135
Figura 4.46. Variação da deformação na ruptura: amostras virgens do fabricante “B” comparadas às retiradas da estufa a 75 °C após 3 meses.....	135
Figura 4.47. Variação no módulo de elasticidade: amostras virgens do fornecedor “B” comparadas às retiradas da estufa a 75 °C após 3 meses.....	136.
Figura 4.48. Amostras de PVC de 1,0 e 2,0 mm retiradas da estufa após 9 meses comparadas às amostras virgens.....	136
Figura 4.49. Amostras de HDPE de 1,0 e 1,5 mm do fornecedor “A” retiradas da estufa após 3 e 9 meses comparadas às amostras virgens.....	137
Figura 4.50. Amostras de HDPE de 1,0 e 1,5 mm do fornecedor “B” retiradas da estufa após 3 meses comparadas às amostras virgens.....	138
Figura 4.51. Amostras de PVC após 8 meses de imersão em gasolina.....	144
Figura 4.52. Relação entre as espessuras antes e após imersão em óleo diesel e gasolina por 6 meses.....	144

Figura 4.53. Relação entre os pesos antes e após imersão em óleo diesel e gasolina por 6 meses.....	145
Figura 4.54. Variação de resistência à tração entre as amostras virgens e após imersão em gasolina e óleo diesel por 6 meses.....	147
Figura 4.55. Variação na deformação na ruptura entre as amostras virgens e após imersão em gasolina por 6 meses.....	148
Figura 4.56. Relação entre o módulo de elasticidade das amostras de PVC e HDPE virgens e após imersão em gasolina e óleo diesel por 6 meses.....	149
Figura 4.57. Curva tensão deformação: amostras de PVC de 1,0 mm virgem comparada às imersas em gasolina e óleo diesel.....	149
Figura 4.58. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 1,0 mm imersa em gasolina.....	151
Figura 4.59. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 1,0 mm imersa em Óleo diesel.....	151
Figura 4.60. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 2,0 mm imersa em gasolina. ...	152
Figura 4.61. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 2,0 mm imersa em Óleo diesel.....	152
Figura 4.62. Ensaio de TGA. Amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm comparadas às imersas em gasolina e óleo diesel.	153
Figura 4.63. Ensaio de DSC. Amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm comparadas às imersas em gasolina e óleo diesel.....	154
Figura 4.64. Variação da resistência à tração na ruptura com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	159
Figura 4.65. Variação da deformação na ruptura com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	159
Figura 4.66. Variação do módulo de elasticidade com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	160
Figura 4.67. Variação da resistência ao rasgo com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	161
Figura 4.68. Variação da resistência ao puncionamento com o tempo de na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	161
Figura 4.69. Variação da deflexão na ruptura com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.....	162.

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

TABELA 2.1. Tipos de Geossintéticos <i>versus</i> possíveis aplicações (KOERNER, 1997).	21
TABELA 2.2. Influência do peso molecular no “ponto de fusão” e no aspecto dos materiais derivados do monômero etileno, (KOERNER, 1997).....	23
TABELA 2.3. Geossintéticos poliméricos comumente usados e suas fórmulas aproximadas, KOERNER, 1997.....	27
TABELA 2.4. Valores de Tg e Tm para vários polímeros, (ABIGAIL, 1992).	29
TABELA 2.5. Vantagens e desvantagens do uso das geomembranas de PVC e de PHDE, (SHARMA & LEWIS, 1994).....	32
TABELA 2.6. Intervalos de densidades para vários tipos de geomembranas de polietileno, (SHARMA & LEWIS, 1994).....	34
TABELA 2.7. Tendência de comportamento das resinas de polietileno relacionada ao aumento da densidade, (SHARMA & LEWIS, 1994).	35
TABELA 2.8. Detalhes dos métodos de ensaios recomendados para geomembranas, (KOERNER, 1997).....	38
TABELA 2.9. Propriedades de acordo com o comportamento de tração para geomembranas de HDPE, VLDPE, PVC e CSPE-R, (KOERNER, 1997).	39
TABELA 2.10. Propriedades de acordo com o comportamento de tração para geomembranas de HDPE, VLDPE, PVC e CSPE-R, (KOERNER, 1997).....	41
TABELA 2.11. Propriedades em ensaio axi-simétrico de tração para geomembranas de HDPE, VLDPE, PVC e CSPE-R, (KOERNER, 1997).....	43
TABELA 2.12. Coeficiente de expansão térmica linear de geomembranas poliméricas, (HALSE & RIGO, 1991).	50
TABELA 2.13. Intervalos típicos de resistência ao rasgo para várias geomembranas, ensaiadas de acordo com a norma ASTM D 1004 (SHARMA & LEWIS, 1994).	56
TABELA 2.14 Características de resistência ao estouro para geomembranas de HDPE e PVC, (HOEKSTRA, 1991).	57

TABELA 2.15. Resultados típicos de ensaios ao puncionamento para várias geomembranas poliméricas, (SHARMA & LEWIS, 1994).	59
TABELA 2.16. Aderência para geomembranas (WILLIANS & HOULIHAN, 1987).....	61
TABELA 2.17. Valores de pico do atrito geomembranas/ solo, (KOERNER, 1997).	62
TABELA 2.18. Coeficiente linear de expansão térmica (KOERNER, 1997).	65
TABELA 2.19. Guia geral da resistência química para algumas geomembranas mais comuns, (KOERNER, 1997).	74
TABELA 2.20. Sugestão para valores limites de diferentes ensaios em geomembranas incubadas, (KOERNER, 1997).	78
TABELA 2.21. Resultados encontrados nos ensaios de tração e rasgo, realizados em amostras de PVC amostras após 2, 4, 5, 9, 14 e 19 anos após instalação, (STAFF, 1991)....	82
TABELA 2.22. Projeto de norma ASTM para geomembrana de HDPE utilizada em sistemas de contenção de aterro sanitários, (KOERNER, 1996).	84

Capítulo 3

TABELA 3.1. Caracterização dos líquidos percolados para a lagoa de chorume do aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.	89
--	----

Capítulo 4

TABELA 4.1. Resultados médios dos ensaios físicos realizados em amostras virgens de geomembranas de PVC e HDPE e os respectivos coeficientes de variação.	102
TABELA 4.2. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm (Lote I).....	105
TABELA 4.3. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm (Lote II).....	107
TABELA 4.4. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “A”.....	109
TABELA 4.5. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “B” ...	111
TABELA 4.6. Resultados obtidos no ensaio de DSC nas amostras virgens de HDPE.....	114
TABELA 4.7. Resultados obtidos no ensaio de TGA, realizados nas amostras virgens de PVC.....	116

TABELA 4.8. Resultados médios obtidos no ensaio de tração, rasgo e punção realizados em amostras de PVC e HDPE de 1,0 mm retiradas do Aterro Experimental Bandeirantes, 18 meses após seu encerramento.....	117
TABELA 4.9. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras virgens e retirada do Aterro Experimental.....	122
TABELA 4.10. Resultados médios dos ensaios físicos realizados na amostras virgem e amostra retirada do Aterro classe I, após 12 anos de seu encerramento.....	123
TABELA 4.11. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados nas amostras de PVC virgem e retirada do aterro classe I após 12 anos de seu encerramento.....	124
TABELA 4.12. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras virgens e retirada do aterro classe I.....	126
TABELA 4.13. Resultados médios de espessura e peso, em amostras de PVC e HDPE de diferentes espessuras antes, após 1, 3 e 9 meses de exposição à temperatura de 75°C.....	127
TABELA 4.14. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras de PVC e HDPE retiradas da estufa a 75 °C após 3 períodos de exposição. . .	129
TABELA 4.15. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras de PVC virgens e retiradas da estufa após 9 meses de exposição... ..	137
TABELA 4.16. Resultados obtidos no ensaio de DSC, realizado nas amostras de HDPE dos fornecedores “A” e “B” antes e após exposição à temperatura.....	138
TABELA 4.17. Resultados médios de espessura e peso, em amostras de PVC (Lote II) e HDPE (Fornecedor “B”) antes e após imersão em gasolina e óleo diesel por 6 meses.	143
TABELA 4.18. Resultados encontrados no ensaio de tração em amostras de PVC e HDPE de diferentes espessuras após 6 meses de imersão em óleo diesel e gasolina.....	146
TABELA 4.19. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras de PVC virgens e retiradas da estufa após 9 meses de exposição.....	150
TABELA 4.20. Resultados obtidos no ensaio de DSC realizado nas amostras de HDPE virgens e imersas em gasolina e óleo diesel.....	153
TABELA 4.21. Resultados médios de espessura e peso, em amostras de PVC e HDPE de diferentes espessuras antes e após imersão na lagoa de chorume por períodos de 5 e 8 meses.....	157

TABELA 4.22. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras de PVC e HDPE retiradas da lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos após 5 e 8 meses de imersão..... . 158

LISTA DE SÍMBOLOS

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

USEPA = *Environmental Protection Agency*

MBC = *Multi-Barrier Concept*

CQA = *Construction Quality Assurance*

GRI = *Geosynthetic Research Institute*

PE = polietileno

HDPE = polietileno de alta densidade (em português PEAD)

MDPE = polietileno de densidade média

VLDPE = Polietileno de densidade extremamente baixa

LDPE = Polietileno de baixa densidade

LLDPE = Polietileno linear de baixa densidade

PVC = Policloreto de vinila

PET = Polietileno tereftalato

CSPE = Polietileno clorosulfonado

CSPE-R = Polietileno clorosulfonado reforçado

EIA = interpolímero etileno alloy

GM = Geomembrana

GCL = Geocomposto argiloso

CCL = Camadas de argila compactadas

GT = Geotêxtil

GG = Geogrelhas

GGE = Geogrelha extrusada

GGB = Geogrelha soldada

GGW = Geogrelha tecida

GEC = Geossintético para controle de erosão

GC = Geocomposto

GP = Geotubo

E = Controle de erosão

D = Drenagem

F = Filtração

P = Proteção

R = Reforço

S = Separação

DSC = Análise Termo-Diferencial

TGA = Análise termogravimétrica

IR = Espectroscopia infravermelho

TMA = Análise termomecânica

MI = Índice de Fluidez

NTCL = Corte sob tensão constante

SP -NTCL = Corte sob tensão constante – ponto único

OIT = Tempo de indução à oxidação

ΔH = Entalpia de fusão

RSU = Resíduos sólidos urbanos

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio

DQO = Demanda química de oxigênio

K = permeabilidade do solo

T_g = temperatura de transição vítrea

T_m = temperatura de fusão

σ_p = Resistência à tração na ruptura

ϵ_p = Deformação na ruptura à tração

E = módulo de elasticidade, referente à inclinação da porção inicial 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.

CV = coeficiente de variação referente aos ensaios físicos e mecânicos

RESUMO

O presente trabalho avalia a degradação de geomembranas de polivinil clorado - PVC e polietileno de alta densidade - PEAD (ou do inglês HDPE) após imersão em aterros sanitários e após exposição a temperaturas elevadas bem como a diferentes substâncias agressoras. As geomembranas submetidas ao envelhecimento natural foram amostradas do sistema de impermeabilização de um aterro sanitário experimental de resíduos sólidos urbanos, após 18 meses de sua construção, e de um aterro sanitário de resíduos classe I, após 12 anos de utilização. Além disso, algumas amostras foram colocadas na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos por períodos de 5 e 8 meses. As geomembranas envelhecidas em laboratório constam de amostras expostas à temperatura de 75 °C em estufa por períodos de 1, 3 e 9 meses e amostras imersas em gasolina e óleo diesel por um período de 6 meses. A caracterização das mudanças ocorridas devido à degradação se deu através da realização de ensaios físicos, mecânicos e térmicos de acordo com as normas da ASTM. Na análise da influência na degradação através da exposição a elevadas temperaturas não foi possível identificar uma tendência de comportamento em função do tempo de exposição para os dois materiais ensaiados. Mas, verificou-se que as membranas de PVC, quanto mais espessas, melhor resistiram ao efeito da temperatura, enquanto para as mantas de HDPE ocorreu o contrário em muitos parâmetros analisados. O contato com gasolina e óleo diesel afetou as duas geomembranas, com mais intensidade para as amostras de PVC. Na análise da influência do envelhecimento natural, pode-se constatar que a geomembrana de PVC de 1,0 mm apresentou um aumento de rigidez manifestado por um aumento de módulo de elasticidade, da ordem de 120 %, enquanto as amostras de HDPE de mesma espessura praticamente não apresentaram variações. Por outro lado, a amostra de PVC retirada do aterro classe I, após 12 anos de utilização, praticamente não apresentou alteração, quando comparada à amostra virgem tomada como referência, podendo-se atribuir as variações encontradas aos próprios coeficientes de variação dos ensaios.

ABSTRACT

This dissertation deals with degradation of Polyvinyl Chloride (PVC) and High Density Polyethylene (HDPE) after natural ageing and after exposition to high temperature, as well as to aggressive substances. The geomembranes submitted to natural ageing were exhumed from the liner systems of an urban waste experimental sanitary landfill, after 18 months of use and of a hazardous waste landfill, after 12 years of use. Besides that, some geomembranes were immersed in leachate during 8 months.

The laboratory aged geomembranas were exposed to a temperature of 75 °C during 1, 3 e 9 months and some were immersed in gasoline and diesel oil during 8 months.

The analyses of degradation were performed through physical, mechanical and thermal tests following ASTM standards.

The temperature changed to some extent the geomembranes properties, but the variation didn't follow a discernible trend in function of time. However, it could be observed that for the PVC, the effect of temperature tended to alter more severely the properties of the thinner membrane, while for the HDPE, the opposite occurred considering many of the analyzed properties.

The gasoline and diesel oil affected both geomembranes, but this was more intense for the PVC geomembrane in order to prohibit its use with such substances.

The 1,0 mm PVC geomembrane from the experimental landfill became stiffer and its modulus of elasticity increased about 120 %. However that from the hazardous landfill didn't show any appreciable variation in the measured properties. On the other hand, the HDPE geomembrane from experimental landfill was not appreciably affected after 18 months of use.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial implica o aumento do uso das reservas do planeta, da produção de bens e também da geração de resíduos. O trato inadequado dos resíduos traz como consequência o aumento da poluição do solo, das águas (subterrâneas e de superfície) e do ar, levando a um contínuo e acelerado processo de deterioração do meio ambiente, com implicações na qualidade de vida da população.

Historicamente, os resíduos sólidos eram depositados diretamente no solo, nas águas de superfície ou nos oceanos. Estas alternativas, tecnicamente inaceitáveis, têm sido gradualmente abandonadas e, atualmente, os aterros sanitários se constituem na opção mais utilizada para a disposição final dos resíduos sólidos.

A necessidade de minimizar a contaminação do solo e das águas subterrâneas, por obras de contenção de resíduos, tem obrigado a adoção de vários tipos de sistemas de impermeabilização. Num primeiro momento, estes sistemas foram compostos por solos naturais ou compactados de baixa permeabilidade, alternativa ainda hoje largamente utilizada. Posteriormente, com o desenvolvimento dos materiais sintéticos, como as geomembranas, surgiram alternativas que conjugam um ou mais destes materiais em arranjos que dependem da periculosidade do resíduo a conter.

Dentre os produtos sintéticos utilizados para desempenhar função de barreira impermeabilizante, destacam-se as geomembranas por apresentar baixa permeabilidade (da ordem de 1×10^{-13} m/s), elevadas características de resistência mecânica e química, além de boa trabalhabilidade.

Um campo vasto de utilização de geomembranas é o dos aterros sanitários onde estas são tipicamente usadas em substituição ou em adição aos solos de baixa permeabilidade, tanto na impermeabilização da base, como da cobertura. Durante a vida útil, as geomembranas são submetidas a diferentes temperaturas, que podem atingir cerca de 60°C , por ocasião dos processos de biodegradação de lixo urbano, por exemplo, e ao ataque de um grande número de substâncias químicas devido ao contato com o percolado. Isto pode vir a modificar suas propriedades e a comprometer sua servicibilidade. A aceitação ou recusa dos materiais

sintéticos depende, portanto, do conhecimento de suas propriedades de engenharia face às condições de utilização em longo prazo.

Tem-se procurado uma maneira de estimar a vida útil das geomembranas utilizadas em sistemas de contenção de resíduos, porém a utilização de mantas neste tipo de obra é relativamente recente. Na Europa, as geomembranas começaram a ser utilizadas em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários na década de 80, o que inviabiliza uma estimativa de vida útil apenas através de dados obtidos em campo. Ensaio acelerados em laboratório associando altas tensões, elevadas temperaturas e/ou presença de substâncias químicas agressoras, para simular o processo de degradação em longo prazo, são então de grande importância.

Neste trabalho investiga-se o efeito do envelhecimento natural e da exposição de geomembrana a diferentes agentes de degradação através de ensaios físicos e mecânicos.

Para tanto, foram retiradas amostras de sistemas de impermeabilização de um Aterro Sanitários Experimental de resíduos sólidos urbanos e de um aterro classe I, bem como colocaram-se amostras de geomembrana em contato direto com algumas substâncias químicas agressoras como gasolina, óleo diesel e o percolato de um aterro de resíduos sólidos. Além disso, procura-se também avaliar o efeito isolado da exposição à elevada temperatura, utilizando temperatura relativamente superior às registradas durante o processo de decomposição do resíduo sólido em aterros sanitários brasileiros, uma vez que várias propriedades das geomembranas poliméricas são sensíveis às mudanças de temperatura. Realizaram-se também alguns ensaios térmicos que permitiram uma análise química das amostras com o objetivo de auxiliar na interpretação dos resultados, visando identificar tanto a degradação da resina polimérica, quanto à perda de algum dos aditivos utilizados na fabricação das geomembranas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A disposição adequada de resíduos se constitui num desafio crescente para toda a sociedade.

Os Estados Unidos lideram a produção de resíduo no mundo. De acordo com o órgão federal de controle ambiental do país, EPA - *Environmental Protection Agency*, cada americano produz 1,63 kg/dia de lixo, sendo gerado duzentos milhões de toneladas de resíduo por ano. Deste total, cerca de 66 % vão para os aterros, 16 % é incinerado e o restante é separado e vai para a reciclagem (IPT, 1995).

No Brasil, segundo o IPT (1995), das 241.614 toneladas de lixo produzidas diariamente, 76% ficam a céu aberto e apenas 24% recebem tratamento adequado.

Segundo BEZERRIL (1999), só na cidade de São Paulo, são produzidos, diariamente, cerca de 15 mil toneladas de detritos de lixo, aproximadamente 1,5 kg por habitante. De acordo com os resultados encontrados na caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos sólidos domiciliares no município de São Paulo, tem-se que o percentual de matéria orgânica encontrada vem sofrendo uma redução aos longos dos anos, devido à industrialização e as mudanças de hábitos alimentares, mas mantém-se ainda como o principal componente dos resíduos sólidos domiciliares, compreendendo a 48 %, em média, de sua composição.

Recentemente, nos EUA e na Europa, tem ocorrido um crescente incentivo para que uma porcentagem maior de resíduos sólidos urbanos (RSU) seja disposta através de métodos alternativos como a incineração e reciclagem. No entanto, considerando as questões quanto ao custo e problemas associados às técnicas alternativas de disposição, o aterro sanitário ainda será considerado o principal método num futuro próximo (WOJNAROWICZ et al., 1998).

Os aterros sanitários têm como elementos estruturais básicos os seguintes componentes (Figura 2.1):

- Células de resíduos: volume de resíduos depositados, num período que compreende, geralmente, 24 horas, incluindo o material de recobrimento.
- Tratamento de Fundação: tem a função de proteger o subsolo e aquíferos adjacentes da contaminação pela migração de percolados e/ou dos gases proveniente do aterro, através de sistemas de captação e drenagem de todas as nascentes e cursos d'água que existam na área e da impermeabilização do terreno de fundação. Dentre os materiais comumente empregados em tratamento de fundação de aterros, destacam-se as argilas compactadas, os GCL e as geomembranas, utilizados de forma isolada ou combinadamente.
- Drenagem de líquidos e gases percolados: estes sistemas de drenagem devem permitir a dissipação dos gases e a remoção, captação e condução dos líquidos percolados aos sistemas de reservação e tratamento. São usados para isso drenos de fundação, drenos horizontais e drenos verticais.
- Recobrimento diário: corresponde ao recobrimento das células durante as operações executivas, com solo ou matérias alternativos, com o objetivo de evitar o espalhamento do resíduo, o aparecimento de vetores, como mosca, insetos, etc, que possam causar problemas de saúde pública, e de controlar a entrada de água no maciço.
- Sistemas de impermeabilização da cobertura dos aterros: após esgotada a capacidade do aterro deve ser efetuada a impermeabilização da cobertura com a função de diminuir a formação de percolado através da camada de superfície, controlar a saída de gases e servir de suporte para eventuais construções no local.
- Drenagem e proteção superficial: a drenagem superficial das águas provenientes de precipitação direta sobre o aterro bem como as de escoamentos superficiais das áreas adjacentes são fundamentais para minimizar a geração de percolado e evitar que processos erosivos provoquem instabilidade nos taludes e descobrimento dos resíduos. São geralmente constituídos de canaletas, bermas e descidas d'água no talude e são constituídas por elementos flexíveis como mantas, gabião, brita, rachão, etc, separadas da camada de recobrimento por geotêxteis.

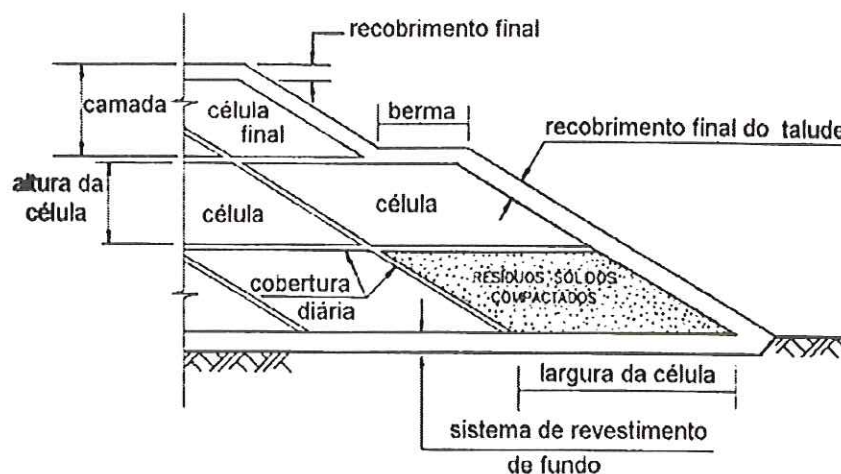


Figura 2.1. Estrutura de um aterro sanitário (ENGEORPS, 1996).

Com o objetivo de uma maior proteção do meio ambiente têm sido desenvolvidos sistemas de impermeabilização de aterros sanitários associando matérias sintéticas a solos naturais que procuram minimizar a percolação dos líquidos e gases provenientes do aterro, evitando que estes atinjam o solo e águas subterrâneas.

Duas classes de produtos sintéticos são utilizadas pela engenharia geotécnica para desempenhar a função de barreira impermeabilizante: geomembranas (GM) e geocompostos argilosos para barreira impermeabilizante (GCL). A aceitação ou recusa destes materiais geossintéticos deve estar embasada no conhecimento de suas propriedades de engenharia face às condições de utilização. Um grande esforço foi e vem sendo desenvolvido no sentido de estabelecer ensaios de laboratório que permitam caracterizar e controlar a qualidade dos produtos e determinar suas propriedades (VIDAL, 1998).

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo reunir informações a cerca do comportamento de geomembranas utilizadas em aterros sanitários, apresentando conceitos gerais aplicáveis a aterros sanitários. Estes incluem informações sobre a impermeabilização de aterros, os tipos e propriedades das geomembranas utilizadas e os ensaios necessários para identificação e caracterização das geomembranas. Apresenta-se também um paralelo entre as vantagens e desvantagens da utilização de geomembranas de polietileno de alta densidade (HDPE) e de polivinil clorado (PVC), como barreira impermeabilizante da base e da cobertura de aterros sanitários.

2.2 Conceitos Gerais

Serão apresentadas a seguir algumas definições básicas relacionadas à disposição final dos resíduos sólidos urbanos com o objetivo de uniformização de alguns conceitos e terminologias:

- **Aterros sanitários de resíduos urbanos**, segundo a NBR 8419, consistem na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou risco à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou intervalos menores se necessário.

De acordo com o IPT, (1995) tem-se:

- **Disposição a céu aberto ou lixão**: forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos que caracteriza-se pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Sem qualquer controle quanto aos tipos de resíduos recebidos nestes locais verificando-se até mesmo a disposição de dejetos originados do serviço de saúde e das indústrias.
- **Aterro controlado**: técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Geralmente não dispõe de sistemas de impermeabilização da base (comprometendo a qualidade das águas subterrâneas), nem sistemas de tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados.
- **Resíduos sólidos**, segundo a norma brasileira da ABNT 10.004/87 consiste de todo resíduo no estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Para efeito desta norma os resíduos são classificados como:

- a) **Resíduo classe I** – perigos: são aqueles que apresentam periculosidade por inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade;
- b) **Resíduo classe II** – não inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe III. Os resíduos classe II podem

apresentar propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- c) **Resíduo classe III** – abrangem os resíduos inertes e não perigosos. Como exemplo destes materiais, podem-se citar rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

A CETESB (1993), no seu item definições, distingue os resíduos sólidos entre:

- **Resíduos sólidos industriais:** são os resíduos sólidos e semi-sólidos resultantes do processamento industrial, assim como determinados resíduos líquidos oriundos do mesmo processamento que, por suas características peculiares, não podem ser lançados na rede de esgoto ou em corpos de água e não são passíveis de tratamento pelos métodos convencionais. Incluem-se também os lodos provenientes das estações de tratamento de efluentes.
- **Resíduos semi-sólidos:** materiais, produtos e substâncias resultantes dos processamentos industriais e de estações de tratamento de efluentes que não são passíveis de reaproveitamento e apresentam características semi-sólidas.
- **Resíduos sólidos urbanos:** são todos os resíduos sólidos produzidos em edificações residenciais, em estabelecimentos públicos e do comércio em geral, assim como aqueles resultantes das diversas atividades da limpeza urbana. Excluem-se os resíduos sólidos industriais, conforme definidos acima, e os resíduos produzidos em estabelecimentos hospitalares, portos e aeroportos que, por suas características peculiares e, conforme legislação vigente, exigem cuidados especiais quanto ao acondicionamento, coleta e disposição final.

A norma da CETESB (1993), para apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, apresenta as seguintes definições:

- **Percolado:** líquido que passa através de um meio poroso, para filtração ou extração de substâncias desse meio. Em um aterro sanitário, o percolado compreende geralmente o sumeiro diluído em águas percoladas em massa de resíduos e material lixiviado.
- **Lixiviação:** operação de deslocamento ou arraste por meio líquido de certas substâncias contidas nos resíduos sólidos
- **Sumeiro ou chorume:** líquido produzido pela decomposição da matéria orgânica, disposta em aterros sanitários, que tem como características a cor negra, o mal cheiro e a elevada DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio).
- **Impermeabilização,** de acordo com a norma técnica da CETESB 01.012/85 é o processo pelo qual se impede ou, pelo menos, se reduz substancialmente a percolação de líquidos da massa dos resíduos aterrados, através de deposição de uma camada de

material (natural ou artificial) que não se deixe atravessar por fluidos ou dificulte a penetração destes.

2.3 Impermeabilização

No passado as barreiras de impermeabilização usadas em sistemas de contenção de resíduos sólidos consistiam simplesmente de uma única camada ou de argila compactada ou de geomembrana. Em muitos casos, adotavam-se medidas não específicas para controlar a migração de poluentes do aterro sanitário sobrejacente para o subsolo natural de baixa permeabilidade (MANASSERO, 1997).

A concepção atual de projeto de aterro sanitário assume que os percolados (fluidos e gases tóxicos) devem ser, o mais rapidamente possível, coletados e conduzidos aos sistemas de tratamento, nunca se depositando nas interfaces em contato com o meio ambiente.

Os sistemas de impermeabilização devem garantir o revestimento de todas as interfaces com o meio ambiente, considerando de acordo com VIDAL et al. (1994):

- Um revestimento de fundo que protege a fundação e as laterais de contenção, e;
- Um revestimento de cobertura, com as funções de coletar e facilitar a condução dos gases, além de impedir a infiltração de água, minimizando o volume dos percolados a serem tratados.

As obras envolvendo sistemas de impermeabilização com geossintéticos podem ser de contenção ou de confinamento de produtos sólidos, fluidos ou gasosos. Porém não se pode garantir que existam materiais totalmente impermeáveis e a experiência tem mostrado que, mesmo com o melhor controle de qualidade, ainda podem subsistir imperfeições nas juntas e emendas ou pequenos danos de instalação, no caso das geomembranas, ou fissuramento e zonas de fluxo preferencial, no caso de camadas argilosas, com eventuais fugas localizadas. Face a isto, muitos institutos de proteção ambiental têm dado a importância necessária a este campo de pesquisa, resultando em diretrizes (normas) que definem perfis básicos de sistemas de contenção associando materiais sintéticos e solos naturais.

No Estados Unidos, por exemplo, segundo a USEPA, os requerimentos mínimos quanto aos sistemas de impermeabilização são em função do tipo de resíduo depositado. O resíduo é classificado em resíduo perigoso ou em resíduo não perigoso, e função do (KOERNER, 1996):

- Tipo de percolado específico do local;
- MS/GC do percolado;

- Do tipo de substância química presente no resíduo: existem listas com, aproximadamente, 800 tipos diferentes de substâncias químicas, e;
- Em função da concentração de substâncias químicas.

A Figura 2.2, segundo KOERNER & FAHMY (1995), apresenta detalhes de sistemas de impermeabilização, recomendados pela USEPA (*Environmental Protection Agency – USA*) para três seções típicas:

A Figura 2.2(a) representa a recomendação mínima da USEPA para resíduos sólidos não perigosos. Consiste de um sistema de impermeabilização simples, geomembrana (GM)/camada de 600 mm de argila compactada (CCL), sob um sistema drenante para coleta de percolado. Este órgão considera sistemas simples aqueles constituídos de pelo menos uma geomembrana associada a uma camada de solo compactado.

As possíveis substituições em termos de utilização de materiais geossintéticos são:

- Geocomposto argiloso (GCL) por solo argiloso compactado (CCL);
- Georede (GN) no lugar de camada de areia para detecção de infiltrações;
- Geotêxtil (GT) por areia para filtro.

A Figura 2.2 (b) apresenta a recomendação mínima da USEPA para resíduos sólidos perigosos. Consiste de sistema de impermeabilização duplo, composto por duas geomembranas e camada argilosa de 900 mm, completado por uma camada de detecção de infiltração e por um sistema de coleta de percolado acima da geomembrana principal. As possíveis substituições por materiais geossintéticos estão apresentadas abaixo:

- Camada de argila compactada (CCL) por Geocomposto argiloso (GCL) na segunda barreira impermeabilizante;
- Georede (GN) no lugar da camada de areia para detecção de infiltração;
- Geotêxteis (GT) por areia para filtro.

A Figura 2.2 (c) ilustra um sistema de impermeabilização duplo com ampla utilização de geossintéticos. A barreira inferior é composta por GM/CCL e a barreira superior é composta GM/CCL. As camadas de detecção de infiltração e de drenagem de percolado são ambas compostas por GN/GT. Note que acima da camada de CCL todos os materiais são geossintéticos. Este tipo de seção é muito usado no caso de aterros onde a estabilidade das camadas de pedregulho e areia para coleta do percolado está em questão. Na base do aterro, camadas de pedregulho e areia (ou GT) são usadas como drenos de percolado, onde recomenda-se a instalação de geotubos para garantir uma rápida transmissão e condução do percolado até o poço de recepção.

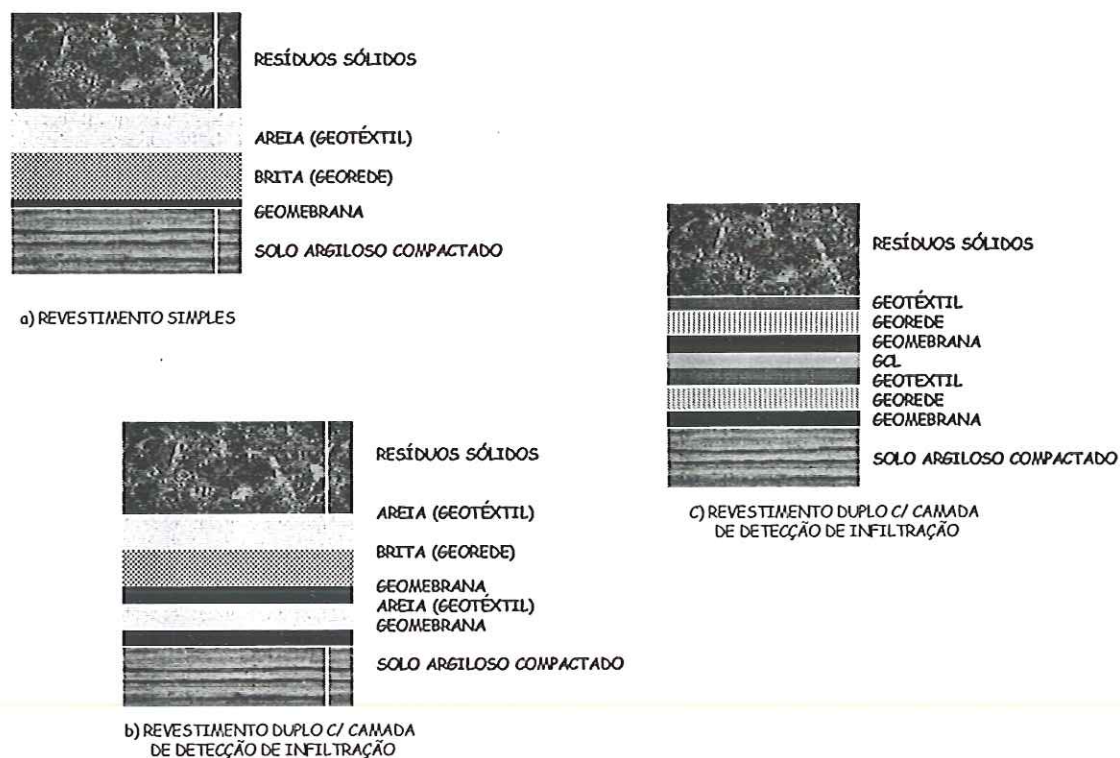


Figura 2.2. Sistema de impermeabilização recomendado pela USEPA (*Environmental Protection Agency* – USA), (KOERNER & FAHMY, 1995).

A disposição final de resíduos na Alemanha considera uma disposição definitiva assegurando que no futuro, não ocorra nenhum tipo de dano ou efeitos adversos nem à população nem ao meio ambiente. Desta forma os aterros sanitários devem ser projetados, construídos e operados de acordo com o conceito de multi-barreiras (*Multi-Barrier Concept - MBC*) isto é, utilizando sistemas de impermeabilização compostos para qualquer tipo de resíduos. Considera-se que alguma barreira efetiva independente deve impedir (retardar) algum possível vazamento e espalhamento de poluente proveniente do aterro para o meio ambiente. Além da utilização de sistemas de impermeabilização compostos, determina-se que (ENGLEMANN, 1996):

- Os aterros sejam construídos em locais com características geológicas e hidro-geológicas apropriadas;
- Um pré-tratamento do resíduo para minimizar o teor de poluentes e a geração de percolato;
- Monitoramento do comportamento do aterro durante a operação e após o encerramento. O monitoramento inclui: controle da geração de percolato (volume e composição), temperatura do resíduo, recalques, comportamento dos sistemas impermeabilização, de

drenagem, dos tubos enterrados, do lençol freático, da vegetação e dos sistemas de cobertura final.

Como as geomembranas podem estar sujeitas a algum tipo de alteração natural ou outro tipo de degradação e espera-se que elas tenham uma vasta vida útil, existem algumas restrições quanto ao tipo de material utilizado na sua fabricação. Determina-se que as geomembranas sejam fabricadas por materiais que apresentem elevada resistência química. Além disso, as geomembranas inseridas em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários devem ser testadas quanto aos mecanismos que podem vir a degradá-las, como:

- Tensões aplicadas durante a construção;
- Elevadas temperaturas;
- Oxidação;
- Ataques químicos;
- Perda de plastificantes.

Pode-se observar que os sistemas de impermeabilização da base e cobertura de aterros sanitários construídos em muitos países do mundo são projetados em função do tipo específico de resíduo depositado e são modificados de acordo com os regulamentos específicos de cada país. As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram as configurações para sistemas de cobertura e impermeabilização da fundação de aterros sanitários adotados em vários países (VAN IMPE, 1998; MANASSERO et al., 1998).

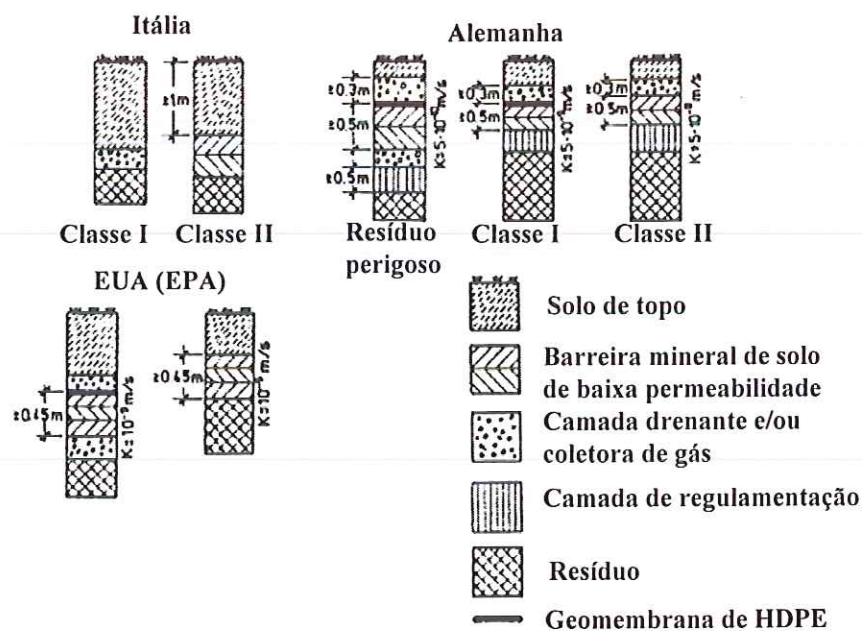


Figura 2.3. Sistema de cobertura final mínimo segundo diferentes recomendações e regulamentações (VAN IMPE (1998); MANASSERO et al., (1998)).

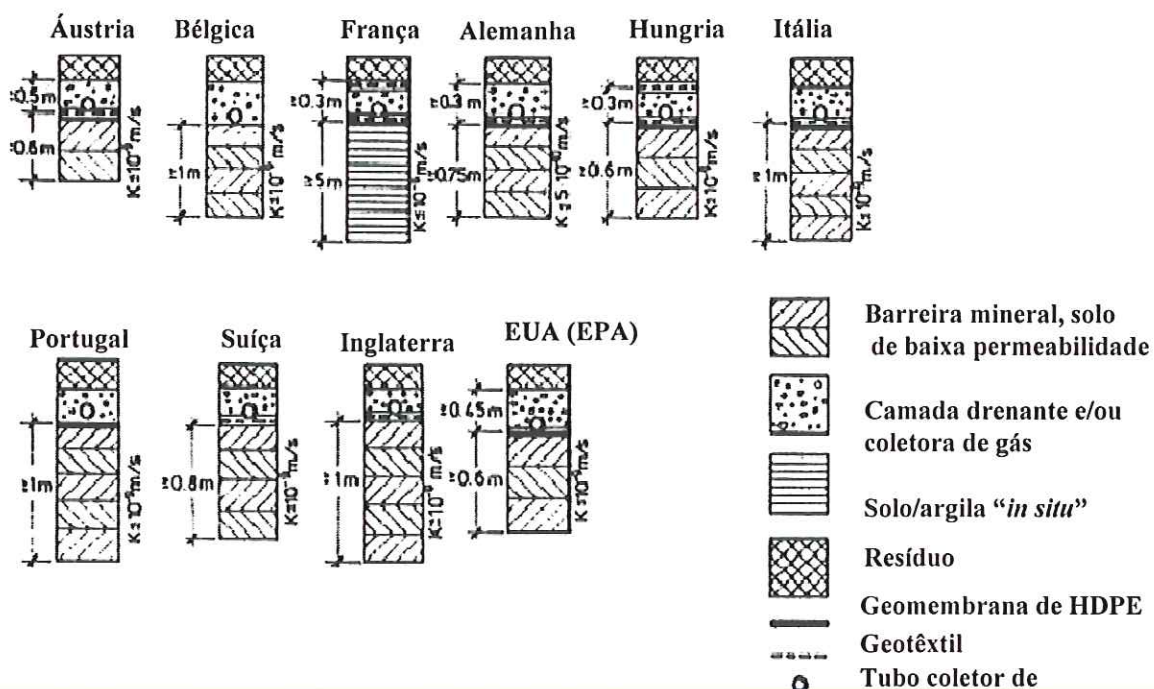


Figura 2.4. Sistemas de impermeabilização da base de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de acordo com diferentes recomendações (VAN IMPE (1998); MANASSERO et al., (1998)).

No Brasil ainda não se tem recomendação nacional mas vários organismos, como a CETESB, recomendam barreiras protetoras quando da contenção de rejeitos perigosos.

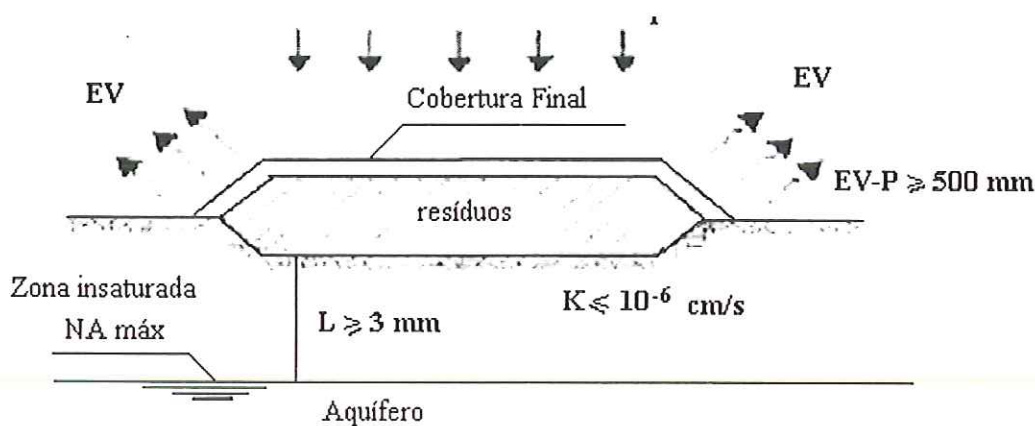
A CETESB, (1993) apresenta algumas condições mínimas quanto às áreas de disposição de resíduos classe II, na qual enquadra-se o resíduo sólido urbano, quanto a necessidade ou não de impermeabilização, como está esquematicamente representado nas Figuras 2.5 e 2.6.

Para terrenos de fundação onde será implantado o aterro, que apresentem permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s e aquíferos a uma profundidade igual ou superior a 3,0 m (Figura 2.5), não há necessidade de impermeabilização da fundação. Porém, para locais que apresentam solos mais permeáveis (permeabilidade da ordem de 10^{-4} cm/s) e posição do nível d'água igual ou inferior a 1,5m, deve-se impermeabilizar a fundação do aterro.

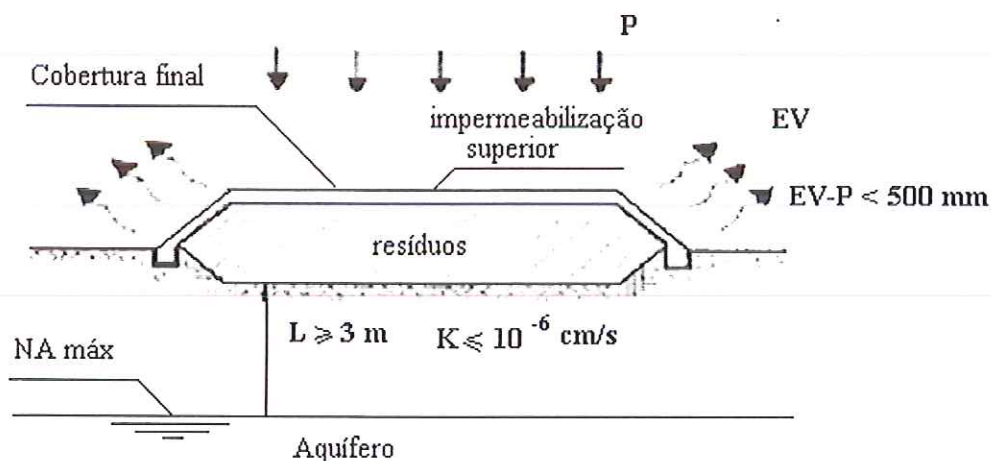
Para resíduos perigosos a CETESB recomenda a combinação de geomembrana com solo argiloso compactado, no caso de subsolo com lençol freático posicionado a menos de 1,5m de profundidade, em relação à base do aterro, e material de fundação de baixa permeabilidade ($K \leq 5 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$). Além disso, as geomembranas devem atender a norma

de compatibilidade com os resíduos a serem enterrados. As argilas devem passar por controle tecnológico de compactação.

A ABNT em seu projeto de norma PN 1:603.06-006 “Aterros de Resíduos não Perigosos – Critérios para projeto, Implantação e Operação”, exige que o selo de vedação do fundo das células, apresente impermeabilidade inferior a 1×10^{-7} cm/s e espessura mínima de 1,0m.

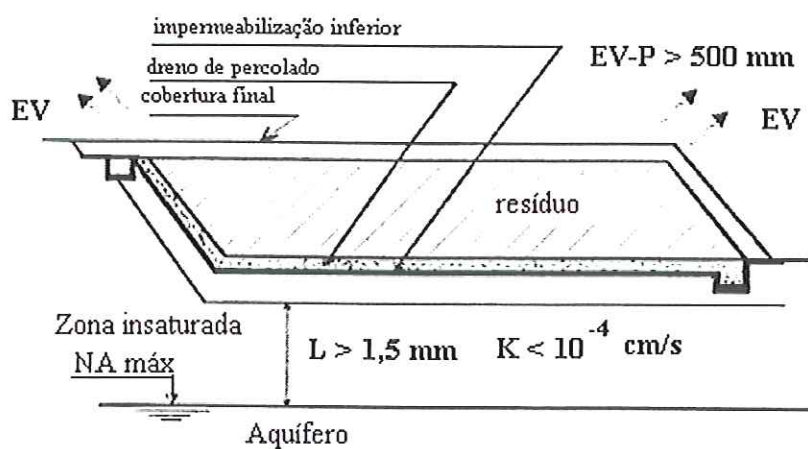


a) Condições climáticas hidrogeológicas favoráveis.

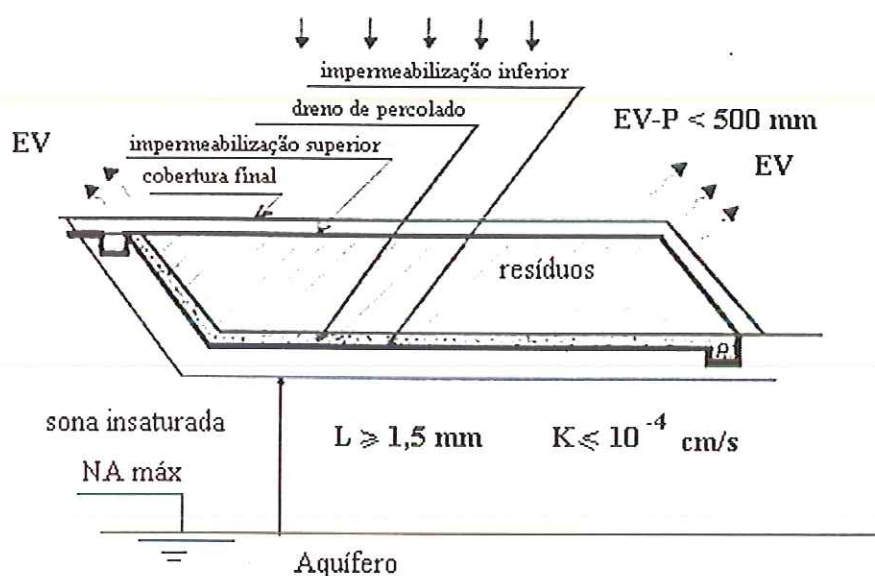


b) Condições climáticas insatisfatórias e hidrogeológicas favoráveis.

Figura 2.5. Esquema de aterros para resíduos classe II, $L \geq 3,0\text{m}$ e $k \leq 10^{-6}$ cm/s (CETESB 1993).



a) Condições climáticas favoráveis e hidrogeológicas insatisfatórias.



b) Condições climáticas e hidrogeológicas insatisfatórias.

Figura 2.6. Esquema de aterro para resíduos classe II, $L \geq 1,50 \text{ m}$ e $K \leq 10^{-4} \text{ cm/s}$ (CETESB 1993).

2.4 Materiais Geossintéticos

2.4.1 Introdução

O emprego de produtos sintéticos na geotecnia vem se generalizando nas últimas décadas por vários motivos, entre os quais podemos citar:

- A dificuldade cada vez maior de obter os produtos naturais na quantidade e com a qualidade que as obras, sempre mais numerosas e de maior vulto, vêm exigindo;
- A necessidade de prevenção do meio ambiente, sendo as camadas argilosas geralmente superficiais exigindo para sua extração o desmatamento de grandes áreas;
- A necessidade de confinar e estocar materiais perigosos, o que obriga a que as condições de confinamento tornem-se cada vez mais rigorosas à medida que cresce a consciência dos riscos a médio e longo prazo;
- A simplicidade do controle de qualidade de produtos industrializados em relação ao controle de compactação.

A aplicação de novos produtos é sempre polêmica. Uma das desvantagens que deve ser reconhecida é a falta de conhecimento do comportamento do material e sua durabilidade face às condições de aplicação e ao meio ambiente. Daí a importância do trabalho conjunto dos centros de pesquisa, fabricantes, projetistas e engenheiros de obra (VIDAL, 1998).

O termo Geossintéticos é formado do prefixo “geo” que refere-se a terra e a segunda parte do nome -“sintéticos”- que refere-se a materiais fabricados pelo homem. Os materiais utilizados na fabricação dos geossintéticos são na maioria das vezes provenientes da indústria plástica, isto é, de polímeros primários. Em alguns casos também usam-se fibra de vidro, borracha e materiais naturais (KOERNER, 1997).

2.4.2 Tipos de geossintéticos e suas aplicações

Os geossintéticos são geralmente usados em substituição ou associados aos solos naturais com o objetivo de melhorar suas funções. Embora possam ser empregados em uma ampla variedade de aplicações dentro da engenharia geotécnica, será dado um maior enfoque aos geossintéticos comumente usados em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos e de resíduos perigosos entre outros sistemas de contenção. Estes incluem os geotêxteis, georredes, geogrelhas, geocomposto argiloso para impermeabilização (GCL's) e principalmente as geomembranas. Geomembranas são mantas poliméricas, flexíveis, que possuem permeabilidade extremamente baixa, sendo usadas tipicamente como barreiras de contenção de líquidos e/ou vapor (SHARMA & LEWIS, 1994).

Segundo KOERNER & FAHMY (1995) os tipos de geossintéticos mais utilizados em obras de contenção de resíduos sólidos são:

- **GM - Geomembranas** (*Geomembranes*): são “liners” ou barreiras essencialmente impermeáveis produzidas a partir de materiais poliméricos usados para contenção de vários líquidos e/ou gases.

As geomembranas podem ser:

- geomembranas reforçadas: geomembranas com armadura de reforço incorporada ao produto, formando um produto monolítico;
- geomembranas texturizadas: geomembranas com acabamento superficial com função de aumentar as características de atrito de interface.

A aplicação das geomembranas na geotecnia ambiental é geralmente como elemento de contenção de líquidos (chorume) em sistemas de impermeabilização da base ou da cobertura de aterros sanitários;

- **GCL - Geocomposto argiloso** (*Geosynthetic Clay Liners*): são barreiras hidráulicas manufaturadas constituídas de camada de bentonita ou de outro material de baixa permeabilidade, superposta ou associada a um geossintético e/ou geomembrana, sendo unida mecanicamente por adesivo, agulhamento ou costura. Apresentam uma certa competitividade com as geomembranas ou camadas de argilas compactadas (CCL) e podem ser usadas juntamente com estas formando sistemas compostos de impermeabilização, isto é, GM/GCL, GM/GCL/CCL, GM/CCL/GCL, etc.

Os GCL são fabricados dispondo uma camada de bentonita seca, de aproximadamente 5 mm de espessura, sobre um geossintético no qual é solidarizado. São mais comumente empregadas duas configurações como esta ilustrado na Figura 2.7(a) e 2.7(b). Na Figura 2.7(a) a bentonita está posicionada entre dois geotêxteis e na Figura 2.7(b) a bentonita esta colada sobre uma geomembrana.



a) Bentonita posicionada entre entre dois GCL



b) Bentonita aderida a geomembrana

Figura 2.7. Configurações de tipos de GCL (DANIEL, 1996).

Os tipos de GCL disponíveis são geralmente divididos em duas categorias (Figura 2.8):

- Aquelas onde a solidarização é feita por resina adesiva, geralmente denominados de GCL não-reforçados (uso em áreas planas, ou taludes com inclinação menor que 10H:1V)) e;
- Aquelas onde os geossintéticos externos são mecanicamente solidarizados através de costura ou agulhamento os quais são geralmente denominados de GCL reforçados (uso em taludes).

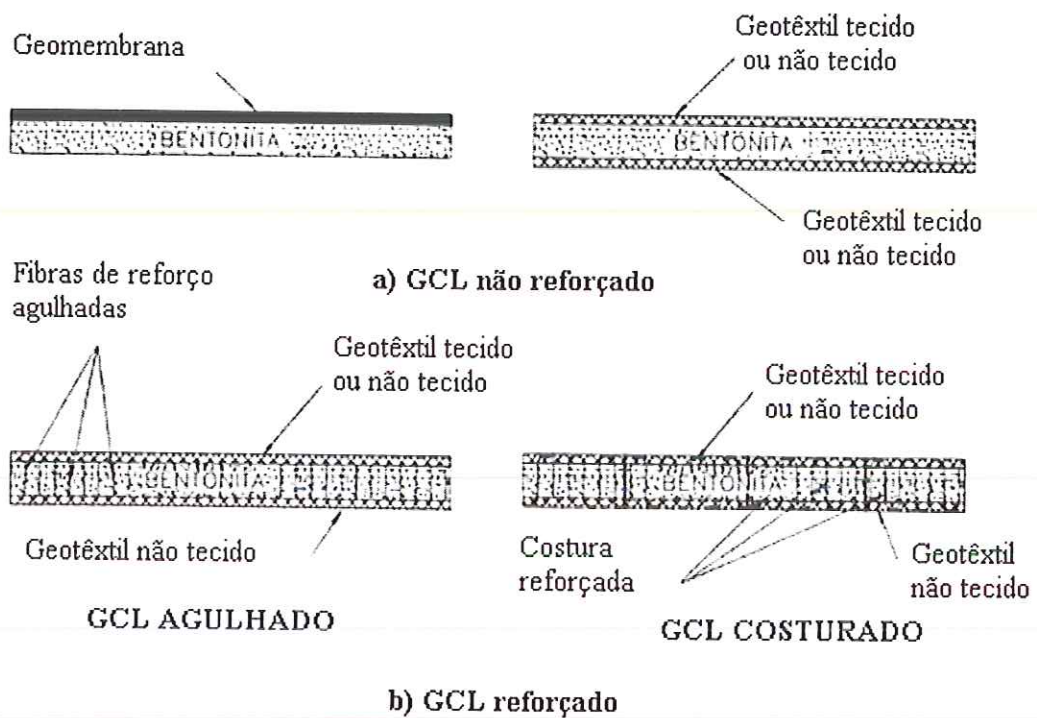


Figura 2.8. Tipos de GCL (DANIEL, 1996).

No processo de instalação, recomenda-se a sobreposição dos painéis em uma faixa mínima de 225mm, conforme esquemas apresentados na Figura 2.9. No caso de GCL constituídos por geotêxteis solidarizados à bentonita por agulhamento (Figura 2.9a), sugere-se normalmente a colocação de bentonita sódica na faixa sobreposta, a uma taxa de cerca de 0.8 kg/m. A bentonita quando hidratada penetra nos poros dos geotêxteis promovendo sua auto selagem. No caso de GCL constituídos por geotêxteis ou por geomembranas, solidarizados a bentonita por processo adesivo, (Figuras 2.9b 2.9c) não é necessária bentonita adicional na faixa de sobreposição. Alternativamente, pode-se dispor e solidarizar

ao material de revestimento uma tira de geomembrana sobre a faixa de sobreposição para garantir a continuidade do material (Figura 2.9d).

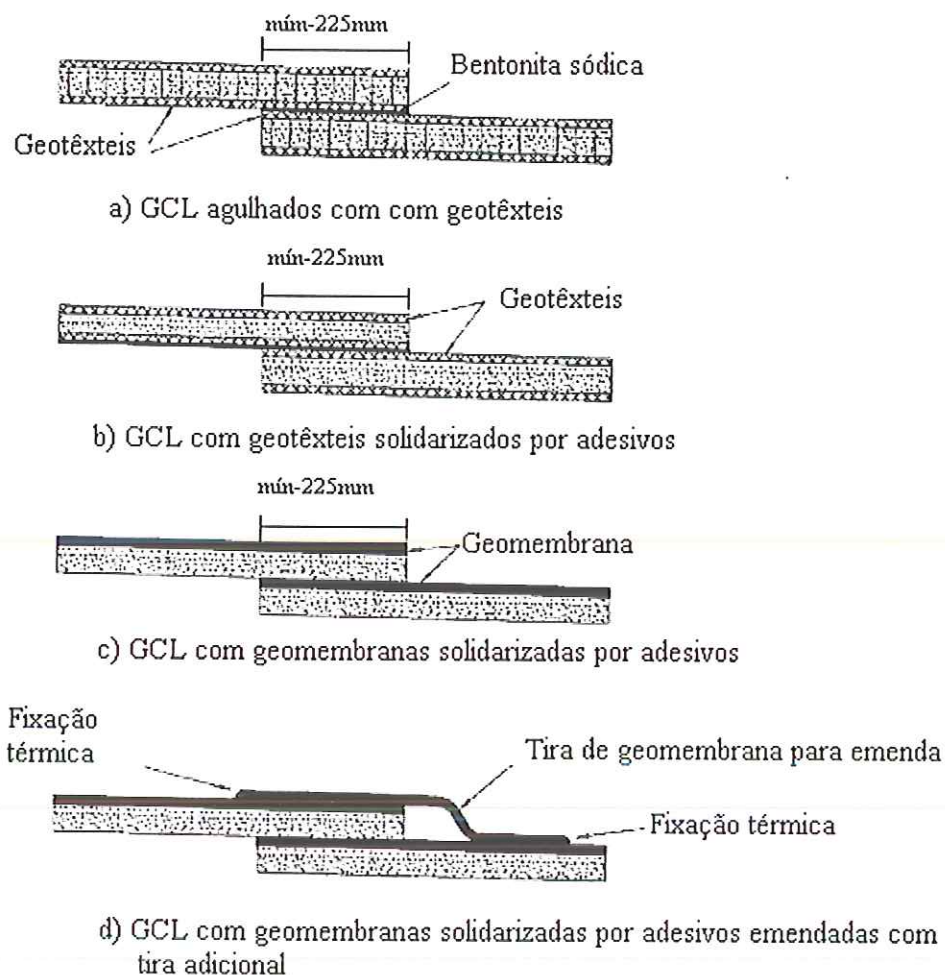


Figura 2.9. Emendas de GCL's – Seções típicas (DANIEL, 1996).

Uma consideração importante diz respeito à influência dos líquidos percolados (notadamente percolados de aterros sanitários) na condutividade do material. Resultados obtidos por DANIEL (1996), demonstraram que o líquido percolado não degrada de forma significativa o GCL, embora os mesmos tenham se mostrado sensíveis a alguns fatores, tais como: composição química do chorume, tensão de confinamento aplicada e composição química do primeiro líquido hidratante (a hidratação inicial com o chorume e não com água conduz a condições desfavoráveis).

- **GT – Geotêxteis** (*Geotextiles*): são materiais poliméricos permeáveis constituídos por fibras têxteis usados para filtração, separação ou reforço.

Os geotêxteis podem ser fabricados em arranjos e mantas tecidas ou não tecidas, divididos em:

- Geotêxtil não tecido: produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos;

- Geotêxtil não tecido agulhado: fibras interligadas mecanicamente, por meio de agulhas dentadas;

- Geotêxtil não tecido termoligado: fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento;

- Geotêxtil não tecido resinado: fibras interligadas por produtos químicos;

- Geotêxtil reforçado: geotêxtil, em geral não tecido, no qual são introduzidos elementos (costura, fios de aço, fios sintéticos, etc) com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas.

- Geotêxtil tecido: produto oriundo do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal).

Aproximadamente 75% dos geotêxteis utilizados atualmente são baseados em resinas de polipropileno, enquanto 20% em poliéster e os outros 5% em um conjunto de resinas que abrange polietileno, poliamida, etc. Como ocorre com todos os geossintéticos, são adicionados vários aditivos às resinas para melhorar suas propriedades e seu comportamento em obra (MARQUES, 1998).

- **Geogrelhas (GG)-** (*Geogrids*); Segundo a ABNT NBR 12553, são estruturas poliméricas planas consistindo de elementos que formam uma malha aberta regular, a qual pode ser unida por extrusão, colagem ou entrelaçamento, nos quais as aberturas são maiores que os elementos constituintes. São usadas em contato com o solo/rocha ou qualquer outro material geossintético em aplicações de engenharia civil.

Em função do processo de fabricação podem ser:

- Geogrelha extrudada (GGE): obtida através de processo de extrusão e sucessivo esfriamento, que pode ser em um único sentido, formando geogrelhas unidirecionais composta geralmente de polietileno e polipropileno.

- Geogrelha soldada (GGB): composta por elementos de tração longitudinais e transversais produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, recobertos por um revestimento protetor e soldados nas juntas.
- Geogrelha estiradas (GGW): composta por elementos de tração longitudinais e transversais produzidas geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, tricotado ou intertecidos nas juntas e recobertos por revestimento protetor.
- **GEC – Geossintéticos para controle de erosão (*Geosynthetic Erosion Control*):** são materiais em configuração tridimensional, com estruturas em forma de treliça e redes usadas para contenção e reforço do solo de superfície acelerando o crescimento de vegetação. O GEC reforça a vegetação, sombreia e se entrelaça com a mesma, formando um tapete que impede o impacto da água de chuva no solo do talude.
- **GC – Geocompostos (*Geocomposites*):** são combinações de um ou mais geossintéticos que algumas vezes incluem o solo natural.
- **GP – Geotubos (*Geopipes*):** são tubos plásticos usados em aplicações na subsuperfície para drenagem de vários líquidos.(água, chorume, efluentes industriais, etc.) e implantados em diques, aterros de resíduos, maciços de solo, etc.

De acordo com a Norma Brasileira ABNT 12553/97 as principais funções dos materiais geossintéticos são:

- Função controle de erosão superficial (E): prevenção da erosão superficial de partículas de solo devido ao escoamento superficial de um fluido;
- Função drenagem (D): coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético;
- Função filtração (F): retenção do solo ou de outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento;
- Função impermeabilização (B): bloqueio ou desvio de fluidos;
- Função proteção (P): limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas;
- Função reforço (R): utilização das propriedades mecânicas de um geossintético para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica;
- Função separação (S): ação de impedir a mistura ou interação de materiais adjacentes.

Os geossintéticos mencionados acima, geralmente são empregados com as funções primárias de separação, reforço, filtração, drenagem ou barreiras impermeabilizantes como esta apresentado na Tabela 2.1 de acordo com suas melhores aplicações.

TABELA 2.1. Tipos de Geossintéticos *versus* possíveis aplicações (KOERNER, 1997).

Tipos de geossintéticos	Funções Possíveis				
	separação	reforço	Filtro	drenagem	impermeabilização
Geomembranas (GM)	S	-	-	-	P
Revestimento argiloso composto (GCL)	S	-	-	-	P
Geotêxteis (GT)	P	P	P	P	P
Georedes (GN)	-	-	-	P	-
Geogrelhas (GG)	-	P	-	-	-
Geossintéticos para controle de erosão (GEC)	P	S	-	-	-
Geocompostos (GC)	P ou S	P ou S	P ou S	P ou S	P ou S
Geotubos (GP)	-	-	-	P	-

Onde:

P = função principal;

S = função secundária.

2.4.3 Uma breve apresentação dos materiais poliméricos

2.4.3.1 Introdução

Da maioria dos geossintéticos apresentados nesta revisão bibliográfica, mais de 95% são provenientes de polímeros sintéticos. A palavra “polímero” vem do grego, onde “*poli*” significa muitas e “*meros*” significa partes. Um material polimérico consiste na junção de várias partes para formar um todo. Cada parte ou unidade é chamada monômero. Desta

forma um monômero é um composto molecular utilizado para formar os polímeros (KOERNER, 1997).

Segundo AGNELLI (1992), polímero é qualquer material orgânico (freqüentemente) ou inorgânico, natural ou sintético (principalmente), de alto peso molecular, cuja estrutura consiste da repetição de pequenas unidades. Uma cadeia polimérica é uma macromolécula formada pela união de meros, ligados por covalência.

Os tipos de cadeias poliméricas, seus pesos moleculares e suas formas de interação definem o tipo de polímero. As condições adequadas para que os monômeros formem polímeros são fornecidas pelas reações de processo químico denominadas polimerização.

A polimerização que forma um polímero com uma única unidade de repetição é chamada homopolimerização e o polímero sintetizado é denominado homopolímero. Cada uma das macromoléculas de um homopolímero pode ser genericamente representada por:

__A-A-A-A-A__

A maioria dos polímeros utilizada na fabricação dos geossintéticos é formada de um único tipo de monômero (monopolímeros). Mas existem também outras possibilidades, como por exemplo, os polímeros formados por duas unidades de repetição os quais são denominados copolímeros (KOERNER, 1997).

Quanto ao método de preparação, as polimerizações se dividem 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. A Figura 2.10 apresenta alguns exemplos de monômeros comuns que formam polímeros de adição, através de poliadições convencionais, como é o caso do polietileno e do e poli(cloreto de vinila) - PVC. As policondensações são polimerizações acompanhadas da formação de subprodutos, com mecanismo de reações em etapas.

2.4.3.2 Peso molecular dos polímeros

O peso molecular de um polímero refere-se ao grau de polimerização, isto é, ao número de vezes que uma unidade de repetição ocorre. O peso molecular médio e sua distribuição estatística são muito importantes no comportamento resultante do polímero (KOERNER, 1997).

A partir do momento em que as cadeias moleculares de um material passam a conter um número de meros superior a cem, isto é, tornam-se cadeias macromoleculares, as propriedades do polímero resultante passam a ter um comportamento intrínseco muito mais relevante do que a influência decorrente da natureza química dos átomos ou dos grupos

funcionais que compõem o(s) mero(s). Isto pode ser observado na Tabela 2.2 que ilustra a influência do peso molecular para os materiais derivados do monômero etileno ou eteno.

TABELA 2.2. Influência do peso molecular no “ponto de fusão” e no aspecto dos materiais derivados do monômero etileno, (KOERNER, 1997).

Número de unidades de repetição - (CH ₂ -CH ₂)	Peso molecular	“Ponto de fusão” °C	Aspecto característico do material a 25 °C	
1	28	-169	Gás	
6	168	-12	Líquido	
36	100	37	Graxa	
71	2000	55	Cera	
143	4000	97	Aspectos de polímero	Cera dura
250	7000	102		Cera mais dura
430	12000	107		Plástico
750	21000	113		Plástico
1360	38000	115		Plástico

De acordo com SIMAL (1992), sabe-se que um composto puro tem peso molecular bem definido o qual é o mesmo para todas moléculas daquele composto. Neste caso o peso molecular pode ser medido não somente através da determinação direta, mas também através da soma dos pesos atômicos dos átomos contidos na molécula.

Entretanto, quando o material analisado é um polímero, não é possível designar um peso molecular bem definido a esse material, como no caso do composto puro. Para que se tenha uma informação completa sobre o peso molecular de um polímero deve-se fornecer também informações sobre a curva de distribuição do peso molecular a partir da qual o peso molecular médio é derivado. A origem desta polidispersividade das moléculas de polímeros esta no processo de síntese, o qual está sujeito a uma série de eventos aleatórios, não permitindo que as moléculas cresçam todas com mesmo tamanho.

Mede-se então o peso molecular médio da amostra polimérica e não o peso molecular individual de cada molécula polimérica, isto é, em termos de cálculo estatístico, numérico ou ponderal, dos pesos moleculares de todas as cadeias macromoleculares que formam a massa polimérica ou o material polimérico (AGNELLI 1992).

O peso molecular de um polímero pode ser determinado por métodos químicos e físicos de análises de grupos funcionais, pela medida das propriedades coligativas, empalhamento de luz, ultracentrifugação ou por viscosidade das soluções diluídas.

As propriedades únicas dos polímeros são resultantes em primeiro lugar do alto peso molecular que possuem. A flexibilidade molecular, ligações de hidrogênio, cristalinidade, ligações cruzadas etc, têm uma participação complementar nestas propriedades (SIMAL, 1992).

MONÔMERO	UNIDADE DE REPETIÇÃO (MERO)	POLÍMERO
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ Etileno	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	$\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_n$ Polietileno
$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}$ Propileno	$-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$	$\left[\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}} \right]_n$ Polipropileno
$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}$ Cloreto de vinila	$-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$	$\left[\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}} \right]_n$ Poli(cloreto de Vinila)
$\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$ Tetraflúor-Etileno	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	$\left[\text{CF}_2-\text{CF}_2 \right]_n$ Poli(Tetraflúor-etileno)
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_2\text{C}=\text{C} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ Metacrilato de Metila	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ -\text{CH}_2-\text{C}- \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\left[\text{CH}_2-\underset{\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}}{\text{C}} \right]_n$ Poli(Metacrilato de Metila)

Figura 2.10. Exemplos de monômeros comuns que formam polímeros de adição, representações usuais simplificadas, (AGNELLI, 1992).

2.4.3.3 Classificação dos polímeros

Segundo AGNELLI (1992), a classificação dos polímeros, em tipos específicos normalmente é feita de cinco modos:

- **Classificação quanto à estrutura química do polímero:** nesta classificação os polímeros podem-se dividir, de acordo com o tipo de átomos que formam suas cadeias principais, em polímeros de cadeia carbônica – onde somente átomos de carbono estão presentes nas cadeias poliméricas principais – e em polímeros de cadeia heterogênea – que possuem átomos diferentes do carbono em suas cadeias poliméricas principais, como é o caso do polietileno e do PVC;
- **Classificação quanto ao método de preparação do polímero:** de acordo com o que foi apresentado anteriormente, a divisão simplificada segundo este critério fornece dois grupos de polímeros, que são os polímeros de adição e os polímeros de condensação.
- **Classificação quanto ao comportamento mecânico do polímero:** com base neste critério os polímeros separam-se em: plásticos e elastômeros.
 - **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, semi-flexíveis ou semi-rígidos e flexíveis.

Em função da qualidade de aplicação em que são empregados, os plásticos podem ser separados em plásticos convencionais ou de engenharia. Os plásticos de engenharia podem ser reforçados com fibra de vidro, ou com outros reforços fibrosos.
 - **Elastômeros:** são polímeros que, na temperatura ambiente, podem ser estirados repetidamente a, pelo menos, duas vezes o seu comprimento original e que, após a retirada do esforço mecânico causador do estiramento, deve voltar rapidamente ao seu comprimento inicial (mesmo que borracha).
- **Classificação quanto às características tecnológicas do polímero:** segundo este aspecto, os polímeros (plásticos) se classificam em termoplásticos e termofixos (ou termorrígidos):

- **Termoplástico:** são polímeros capazes de ser repetidamente amolecidos pelo aumento da temperatura e endurecidos pela diminuição da temperatura. Esta alteração reversível é física e não química, mas pode provocar alguma degradação no termoplástico, para um número elevado de ciclos de aquecimento e de resfriamento. Em função da quantidade e da qualidade da aplicação em que são empregados, os termoplásticos podem ser:

Termoplásticos convencionais (ou de grande uso): polietileno de baixa densidade, polietileno de alta densidade, polipropileno, poliestireno e poli(cloreto de vinila), PVC. Termoplásticos especiais: poli(metacrilato de metila) por exemplo; Termoplásticos de engenharia: náilons, policarbonatos, poliésteres termoplásticos (PBT e PET), etc.

- **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.

- **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 e cadeias com alta densidade de ligações cruzadas.

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.

Existem aproximadamente 50.000 polímeros comercializados atualmente. Felizmente apenas poucos polímeros sintéticos constituem a maioria dos materiais geossintéticos, (KOERNER, 1997).

Nenhum material geossintético é 100% constituído apenas da resina associada ao seu nome. Em todos os casos a resina principal é formulada com aditivos, preenchimentos, extraíveis ou outros agentes com propósitos diferentes, variando de, no mínimo, 3% a no máximo 60%.

Os aditivos sólidos ou líquidos utilizados são: absorventes de radiação ultravioleta (UV), antioxidantes, estabilizadores térmicos, plastificantes, biooxidantes, retardadores de chamas, lubrificantes e agentes antiestáticos.

Segundo AGNELLI (1992), a inclusão dos aditivos nas formulações dos polímeros visa uma ou mais aplicações específicas como, por exemplo, abaixar o custo, modificar, e/ou melhorar diversas propriedades, facilitar o processamento, colorir, entre outras.

A mistura resultante pode ser homogênea ou heterogênea dependendo dos parâmetros de solubilidade dos aditivos *versus* a resina polimérica principal. As formulações variam de polímeros para polímeros. A Tabela 2.3 apresenta as formulações dos polímeros mais usados na fabricação dos geossintéticos (KOERNER, 1997).

TABELA 2.3. Geossintéticos poliméricos comumente usados e suas fórmulas aproximadas, KOERNER, 1997.

Tipo de polímero	Resina (%)	Preenchimento (%)	Negro de fumo ou pigmentação (%)	Aditivos (%)	Plastificantes (%)
Poliétileno	97	0	2-3	0.5-1.0	0
Polipropileno	96	0	2-3	1-2	0
PVC s/ plastificantes	80	10	5-10	2-3	0
PVC c/ plastificantes	35	25	5-10	2-3	30
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
Poliétileno clorofonado	45	20-25	20-25	5-7	0

2.4.3.4 Cristalinidade em polímeros

Em polímeros, a cristalinidade consiste no alinhamento dos segmentos de cadeias em um arranjo tridimensional perfeito. Porém no caso de polímeros termoplásticos, a cristalinidade nunca é total, podendo então ser amorfos ou apresentar cristalinidade parcial, sendo neste caso denominados termoplásticos semi-cristalinos.

Existe uma estreita relação entre a regularidade da estrutura molecular e a cristalinidade de materiais poliméricos. Polímeros tipicamente cristalinos são aqueles cujas moléculas são química e geometricamente regulares na estrutura. Irregularidades ocasionais tais como, a presença de ramificações em polietileno de baixa densidade, limita a extensão da cristalização, mas não impede a sua ocorrência. Cada ponto de ramificação da molécula de polímero constitui uma irregularidade a qual não pode ser encaixada dentro de uma rede cristalina sem que ocorra distorção da estrutura. O polietileno de alta densidade possui alto grau de cristalinidade. As ligações cruzadas têm um efeito semelhante às ramificações onde cada ponto de ligação cruzada é geometricamente equivalente a um ponto de ramificação múltipla (KOERNER, 1997).

A maioria das propriedades físicas, mecânicas e termodinâmicas dos polímeros depende do grau de cristalinidade e da morfologia das regiões cristalinas. Quanto maior o grau de cristalinidade, mais elevadas são as propriedades de densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência à abrasão, temperatura de fusão (T_m), temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de utilização, etc. Por outro lado, reduzem-se as propriedades de resistência ao impacto, alongamento na ruptura, claridade ótica, etc.

Já os polímeros tipicamente amorfo, incluem aqueles onde ocorrem irregularidades na estrutura, como por exemplo, os copolímeros com quantidades significativas de dois ou mais monômeros constituintes muito diferentes entre si. Normalmente os aditivos são substâncias estranhas ao polímero e, portanto, reduz a porcentagem de cristalinidade. Plastificantes quando adicionados ao PVC reduzem a cristalinidade normal de 10 % para zero, mesmo para baixas concentrações (o PVC plastificado é amorfo).

2.4.3.5 Transições térmicas nos materiais poliméricos

Segundo ABIGAILL (1992), os polímeros podem sofrer mudanças de estado que alteram drasticamente as suas propriedades físicas e mecânicas. Os principais determinantes nestas condições são a temperatura, presença de tensões externas e a taxa de realização do experimento (escala tempo), utilizadas para medir a transição considerada. As temperaturas de transição mais importantes no estudo do comportamento de materiais poliméricos são a temperatura de fusão cristalina (T_m) e a temperatura de transição vítrea (T_g).

2.4.3.6 Temperatura de transição vítrea (T_g)

Temperatura de transição vítrea (T_g) (*glass transition*): é uma transição que ocorre nas regiões amorfas. Abaixo de T_g um polímero amorfo (que tem 100% de suas regiões afetadas por T_g) é vítreo, duro, rígido e quebradiço (AGNELLI, 1992). Acima de T_g , aproximadamente 50 °C, os polímeros amorfos apresentam comportamento mole e flexível.

2.4.3.7 Temperatura de fusão cristalina (T_m)

Temperatura de fusão cristalina (T_m), (*melt transition*): é a média da faixa de temperatura em que durante o aquecimento desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos. A energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina, destruindo a estrutura regular de empacotamento e atingindo o estado fundido (viscoso). Esta transição só ocorre na fase cristalina, portanto só tem sentido para polímeros semi-cristalinos. Para termoplásticos cristalinos, fixando o polímero, geralmente $T_m > T_g$ (AGNELLI, 1992). Em homopolímeros lineares semicristalinos, a composição afeta tanto a T_g como T_m da mesma maneira. A análise das temperaturas de transição de vários polímeros indica que a relação T_g/T_m varia entre 0,5 e 0,75. Observou-se que esta razão apresenta valores próximos a 0,5 para polímeros simétricos como o polietileno e 0,75 para polímeros não-simétricos como o poliestireno. A Tabela 2.4 apresenta esta relação (ABIGAIL, 1992).

TABELA 2.4. Valores de T_g e T_m para vários polímeros, (ABIGAIL, 1992).

POLÍMERO	T_g (°C)	T_m (°C)	T_g/T_m (°K)
Borracha de silicone	-123	-58	0,70
Poliisopreno	-70	28	0,67
Poli(fluoreto de vinilideno)	-39	210	0,48
Poli(cloreto de vinila) PVC	82	180	0,78
Poliestireno	100	230	0,75
Polietileno	-68	135	0,50
Polipropileno	-18	176	0,57
Nylon	47	225	0,67

2.5. Geomembranas

2.5.1 Introdução

A origem das barreiras de impermeabilização modernas (*liners*), as quais, no contexto dos geossintéticos são denominadas geomembranas, está intrinsecamente vinculada com o desenvolvimento e crescimento da indústria de polímeros.

Acredita-se que os primeiros tipos de mantas pré-fabricadas utilizadas em obras geotécnicas surgiram nos anos 30, quando ocorreu uma grande fabricação de mantas, a partir de materiais sintéticos termofixos, causando o primeiro impacto significativo. Nos anos 40 já encontravam-se reservatórios de água potável impermeabilizados com a utilização de geomembranas do tipo borracha butyl. Nos anos 50, pesquisas direcionadas à impermeabilização de canais de água foram incumbidas ao *U.S Bureau of Reclamation*. Nos anos 60 e 70, a impermeabilização de canais com PVC era utilizada no Canadá, Rússia, Tailândia e Europa. O polietileno clorosulfonado (CSPE) foi desenvolvido nos EUA e Europa e causou um impacto ainda maior. Polietilenos lineares foram desenvolvidos no Leste da Alemanha e se expandiram para toda a Europa, África, Austrália, e América do Norte.

2.5.2 Tipos de geomembranas e aplicações

Até 1980 havia um grande número de polímeros (pelo menos 20) utilizáveis na fabricação de geomembranas. Eram usadas tanto as resinas termoplásticas, como termofixas, e o processo de seleção era muito confuso, (KOERNER, 1997).

Uma série de acontecimentos promoveu a seleção entre os polímeros deixando apenas alguns competindo no mercado de geomembranas, sendo todos termoplásticos, a saber:

- HDPE ou PHDE (polietileno de alta densidade);
- VLDPE / LDPE (polietileno de baixíssima densidade e de baixa densidade);
- LLDPE = Polietileno linear de baixa densidade
- CSPE (polietileno clorosulfonado);
- PVC poli(cloreto de polivinila);
- EIA (interpolímero etileno alloy).

O fato de sobraarem poucas resinas foi muito saudável no sentido de que certas aplicações das geomembranas tiveram início para tipos específicos de polímeros e melhoramentos foram feitos em cada tipo de geomembrana desde seu aparecimento no mercado. (VIDAL, 1998).

De acordo com a ASTM D 4439, as geomembranas são definidas como:

Geomembranas: *liners* ou barreiras constituídas de membranas sintéticas que apresentam permeabilidade muito baixa e são utilizadas em engenharia geotécnica para controlar a migração de fluidos em sistemas, estruturas ou projetos construídos pelo homem.

As geomembranas poliméricas não são absolutamente impermeáveis, mas são relativamente impermeáveis quando comparadas aos geotêxteis ou aos solos, até mesmo quando comparadas aos solos argilosos. As geomembranas, em ensaios de permeabilidade de água-vapor, apresentam valores típicos de permeabilidade compreendidos entre o intervalo de 1×10^{-12} a 1×10^{-15} m/s. Assim, sua função principal é, na maioria das vezes, como barreira para líquidos ou vapor (KOERNER, 1997).

Usualmente, as geomembranas são aplicadas em três áreas: na área ambiental, transportes e geotécnica.

Em aterros sanitários as geomembranas são tipicamente usadas em substituição ou em adição aos solos de baixa permeabilidade, tanto na impermeabilização da base como na cobertura.

O tipo de geomembrana mais usado em sistemas de impermeabilização da base e cobertura de aterros sanitários é a de polietileno (PE) (isto ocorre principalmente devido à sua alta resistência química e durabilidade), seguido da de polivinil clorado (PVC).

As geomembranas de polietileno de alta densidade (HDPE) são tipicamente usadas na impermeabilização da base. Este material é um tanto rígido, mas geralmente apresenta propriedades físicas boas e podem resistir a altas tensões impostas à geomembrana durante a construção e a instalação. Devido aos grandes recalques a que os resíduos estão sujeitos os sistemas de cobertura requerem uma geomembrana que possua maior flexibilidade. Polietileno de densidade extremamente baixa (VLDPE) é geralmente usado nestes casos, uma vez que possui algumas propriedades do HDPE sendo, porém, mais flexível, e com isto pode tolerar mais adequadamente os recalques sofridos pelos resíduos subjacentes sem apresentar puncionamento.

Nos Estados Unidos, as geomembranas de PVC, foram historicamente recomendadas para aplicações em obras de curto prazo, aproximadamente 1 a 5 anos, devido a incertezas quanto a sua durabilidade a longo prazo (SHARMA & LEWIS, 1994).

Segundo PEGGS (1992), o aumento da aplicação de geossintéticos em geotecnia tem promovido o uso do PVC em obras de longo prazo, como em aterros sanitários de RSU. O mérito das geomembranas de PVC é que estas são, geralmente, menos expansivas que as geomembranas de PE, podem ser fabricadas em grandes painéis, de acordo com as especificações de projeto, o que pode facilitar a instalação. Além disto, as geomembranas de

PVC apresentam outras facilidades quanto à instalação quando comparado às geomembranas de PE já 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.

A Tabela 2.5 Apresenta as vantagens e desvantagens do uso das geomembranas de PVC e de HDPE segundo SHARMA & LEWIS (1994).

TABELA 2.5. Vantagens e desvantagens do uso das geomembranas de PVC e de PHDE, (SHARMA & LEWIS, 1994).

Tipos de geomembranas	Vantagens e desvantagens
PCV (Polivinil clorado) Geomembranas termoplástica amorfa	<ul style="list-style-type: none"> - Boa trabalhabilidade - Elevadas características de resistência - Facilidade de costura e união - Menor resistência aos raios UV e a alguns elementos químicos - Pior desempenho em baixas e altas temperaturas
HDPE (polietileno de alta densidade) Geomembrana termoplástica semi-cristalina	<ul style="list-style-type: none"> - Boa resistência à maioria das substâncias químicas - Boa resistência mecânica e facilidade de união - Bom desempenho em baixas temperaturas - Baixa resistência ao puncionamento (VFPE) - Menores resistências de interface com outros materiais

2.6 Propriedades das Geomembranas e Respectiveos Ensaio de Laboratório

Segundo RIGO & CAZZUFFI (1991), a caracterização de uma geomembrana, quanto a sua durabilidade, requer dois passos principais: ensaios de identificação e ensaios de caracterização propriamente dita, os quais podem ser divididos em ensaios na própria geomembrana, ensaios nas emendas e ensaios para estudos de durabilidade.

No atual estágio de desenvolvimento dos ensaios de laboratório (e correspondentes normas) o tipo de geomembrana tem uma influência particular na escolha do procedimento dos testes de identificação, enquanto os ensaios de caracterização são mais influenciados pela sua aplicação em particular. Se uma geomembrana esta incluída em um "sistema", a programação dos ensaios deve incluir a análise de cada componente do sistema.

2.6.1 Ensaios de identificação

A identificação do material (ou do elemento) que constitui um sistema pode ser realizada por ensaios simples os quais permitem a confirmação de que o produto entregue está conforme as especificações exigidas em projeto. Eles também permitem um bom controle de qualidade de fabricação. Os ensaios de identificação constam de: espessura, densidade, massa por unidade de área, resistência à tração, flexibilidade a baixas temperaturas, espectroscopia infravermelho (IR), análise diferencial de varredura (DSC), análise termogravimétrica (TGA), cromatografia, análise termomecânica (TMA), índice de fluidez (MI), extraíveis, cinzas, dureza, teor de negro de fumo e dispersão de negro de fumo.

2.6.1.1 Espessura

A USEPA (1992) requer que toda geomembrana usada em sistema de contenção de RSU de aterros sanitários tenha no mínimo 0,75 mm (30 mils) de espessura com exceção do HDPE, a qual deve ter pelo menos 1,5 mm (60 mils) 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.

As espessuras das geomembranas geralmente variam entre 0,5 e 3,0 mm (20 e 120 mils) e as larguras entre 1,5 a 4,0 metros. As geomembranas de PVC usadas em sistemas de contenção de resíduos apresentam espessura tipicamente entre 0,75 mm e 1,0 mm (30 e 40 mils) e as geomembranas de PE apresentam espessuras entre 1,5 a 2,0 mm (60 a 80 mils).

Segundo KOERNER, (1997) a determinação da espessura depende do tipo da geomembrana:

- Espessura da manta lisa: determinada geralmente de acordo com a ASTM D5199.
- Espessura da manta texturizada: a norma recomendada para determinação da espessura é a ASTM D5994.

Segundo SHARMA & LEWIS (1994), a ASTM D 767 é recomendada para geomembranas com espessura menor que aproximadamente 3,0 mm (120 mil). Para as geomembranas de superfície lisa todas as normas listadas acima são aceitáveis, mas as mais comumente usadas são ASTM D 374, ASTM D 751 e ASTM D 1593.

2.6.1.2 Densidade

A densidade da geomembrana depende do material base do qual é feita. Existem diferenças distintas mesmo entre polímeros semelhantes. Por exemplo, polietilenos podem ser de densidade extremamente baixa (VLDPE), densidade baixa, densidade média linear (LLDPE), densidade média (MDPE) e alta densidade (HDPE), (KOERNER, 1997).

De acordo com SHARMA & LEWIS (1994), a densidade de todas as geomembranas polimérica está compreendidas entre 0,85 e 1,5 g/cm³. 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, (SHARMA & LEWIS, 1994).

Tipo de PE	Intervalos de densidade da resina (g/cm ³)	Densidade dos composto final (g/cm ³)
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
VLDPE	0,900-0,906	0,911-0,917

As normas indicadas para determinação da densidade são ASTM D 792 e ASTM D 1505, sendo a última norma considerada o método mais preciso.

De acordo com as classificações das ASTM as resinas de HDPE devem ter densidade superior a 0,941 (g/cm³). No entanto, em toda avaliação de geomembranas de HPDE comerciais constatou-se que a resina de polietileno usada apresenta densidade entre 0,934 e 0,938 g/cm³. Neste caso a resina é de polietileno de densidade média (MDPE). Apenas com a adição de negro de fumo (*carbon black*) e de aditivos é que a densidade atinge valores iguais ou superiores a 0,941 mg/l, (KOERNER, 1997).

A densidade do negro de fumo é consideravelmente maior que a densidade dos polímeros tipicamente usados na composição das geomembranas. Existe uma diferença significativa entre a densidade do polímero e a densidade da geomembrana. Recomenda-se que quando especificada a densidade da geomembrana fique claro se esta é a densidade da geomembrana ou do polímero.

GIROUD (1995) estabeleceu uma relação simples entre a densidade da geomembrana e a densidade do polímero, em função do teor de negro de fumo.

Segundo SHARMA & LEWIS (1994), a densidade da resina está diretamente relacionada com o grau de cristalinidade do polímero e conseqüentemente com o

comportamento da geomembrana. A Tabela 2.7 apresenta as tendências de comportamento do polietileno relacionadas ao aumento da densidade.

RIGO & CAZZUFFI (1991), recomendam além das normas da ASTM mencionadas acima as normas ISO R 1183-87e DIN 53479.

TABELA 2.7. Tendência de comportamento das resinas de polietileno relacionada ao aumento da densidade, (SHARMA & LEWIS, 1994).

Propriedades típicas	Tendência de variação de densidade
TÉRMICAS	
Ponto de endurecimento	Grande aumento
Viscosidade e temperatura de derretimento	Aumento
MECÂNICAS	
Espessura	Aumento
Resistência à tração	Aumento
Resistência à torção	Aumento
Resistência ao impacto	Diminuição
Flexibilidade à baixa temperatura	Diminuição
QUÍMICAS	
Resistência ao "cracking"	Diminuição
Permeabilidade	Diminuição
Resistência química	Aumento

2.6.1.3 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 D 3776 (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

Para KOERNER (1997), o peso da geomembrana (atualmente denominado massa por unidade área mas comumente chamado simplesmente de peso) pode ser determinado através da razão de medidas cuidadosas da área da amostra representativa pela medida de sua massa. O resultado é geralmente apresentado em g/m^2 . O ensaio é realizado de forma direta de acordo com a norma ASTM D 1910.

2.6.1.4 Comportamento em solicitações de tração

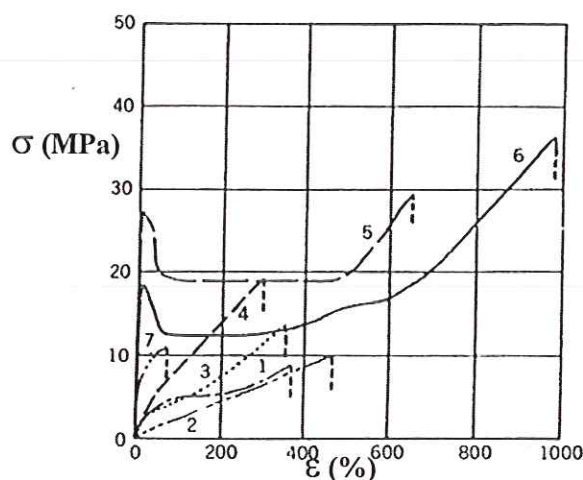
O comportamento em tração é determinado de acordo com ensaios que medem a resistência à tração e o alongamento das geomembranas ensaiadas. Estes são os ensaios mais comumente realizados nos materiais que compõem as geomembranas (SHARMA & LEWIS, 1994).

Segundo KOERNER, (1990), eles podem ser usados para:

- Controle de qualidade durante a fabricação;
- Comparação em processamentos variados;
- Comparação entre produtos diferentes;
- Com objetivo de identificação;
- Avaliar mudanças no comportamento mecânico após incubação;
- Avaliar mudanças no comportamento mecânico após envelhecimento.

Existem inúmeros ensaios disponíveis para medir a resistência à tração e a deformação (ou alongamento) das geomembranas. A maioria dos métodos de ensaios é uniaxial, isto é, a força de tração é exercida ao longo de apenas um eixo. Existem também ensaios multiaxiais os quais medem a resistência à tração e a deformação da amostra em eixos múltiplos simultaneamente.

Os ensaios de tração uniaxiais são realizados em máquinas capazes de permitir uma ampla faixa de alongamento da amostra de geomembrana até atingir a ruptura. As amostras são presas por garras no topo e na base de seu comprimento, são puxadas sob velocidade de deformação constante e a resistência à tração e a deformação da amostra são então determinados. Os resultados são geralmente plotados em gráficos tensão *versus* deformação. A Figura 2.11 apresenta, sob ponto de vista qualitativo, o comportamento quando submetidas à tração de diferentes tipos de geomembranas.



1. Geomembrana de polietileno clorosufonado (CSPE),
2. Geomembrana de borracha de butila (Butyl),
3. Geomembrana de polietileno clorado,
4. Geomembrana de polivinil clorado (PVC),
5. Geomembrana de polipropileno (PP),
6. Geomembrana de polietileno de alta densidade (HDPE),

Figura 2.11. Comportamento tensão-deformação de diferentes tipos de geomembranas, (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

As diferenças entre os tipos de métodos de ensaio de tração estão relacionadas às dimensões normatizadas das amostras, à velocidade de deformação, e ao tipo de material para o qual o ensaio é recomendado. A ASTM D 638 é geralmente usada para polietilenos, a ASTM D 822 para PVC (esta norma é recomendada para membranas com espessura menor ou igual a 1,0 mm) e a ASTM, D 412 para geomembranas não-reforçadas e elastoméricas (SHARMA & LEWIS).

RIGO & CAZZUFFI (1991), no caso de geomembranas não-reforçadas, sugerem o uso de amostras na forma de *dumbbell*, como está representado na Figura 2.12, (de acordo com a ASTM D 638). A dimensão exata da amostra e a velocidade de deformação dependem da norma escolhida e do tipo de polímero. Recomendam, no caso de realização de ensaios de tração com amostras na forma de halteres (*dumbbell-shape*), as seguintes normas:

- ASTM D638 – 84 e ASTM D 882-83 para geomembranas termoplásticas;
- ASTM D 412-83 para elastoméricas e geomembranas não-reforçados;
- ISO R 527-66, DIN 53455 e NT T 54102 também são usadas.

No caso de geomembranas reforçadas (betuminosas, PVC reforçado, elastômero reforçado), amostras retangulares (50 mm de largura por 200 mm de comprimento) são comumente adotadas.



TIPO M-I, M-III



TIPO M-II

Figura 2.12. Amostras na forma "dumbbell", tipos M-I, M-II, M-III e M-IV, de acordo com a ASTM D 638.

KOERNER (1997), recomenda a realização do ensaio de acordo com as normas ASTM D 638, D 882 e D 751. A Tabela 2.8 apresenta recomendações de métodos de ensaio para as geomembranas mais comumente usadas.

TABELA 2.8. Detalhes dos métodos de ensaios recomendados para geomembranas, (KOERNER, 1997).

Geomembranas	HDPE	VFPE; PP	PVC
Ensaio de tração: ASTM	D 638	D 638	D 882
Forma da amostra	Dumbbell	Dumbbell	Strip
Largura da amostra	6.3 mm	6.3 mm	25
Comprimento da amostra	115	115	150
Comprimento das garras	33	33	50
Velocidade de deformação	50 mm/min	50 mm/min	500 mm/min
Resistência	Força / ($w \times t$)	Força / ($w \times t$)	Força / ($w \times t$)
Deformação (mm/mm)	Along/33	Along/33	Along/50
Módulos	Do gráfico	Do gráfico	Do gráfico

Abreviações: w = largura da amostra em (mm), T = espessura da amostra (mm).

Ensaio de Tração Uniaxial em Amostra na Forma de “dumbbell”

A Figura 2.13 apresenta resultados de ensaios a tração uniaxial utilizando amostra na forma de “dumbbell” para várias geomembranas, onde pode-se ver que as geomembranas de HDPE têm um comportamento peculiar. Apresenta uma tensão de escoamento (*yield point*), geralmente tomada como resistência na ruptura, que se reduz ligeiramente com o aumento das deformações até aproximadamente 500%. Caso se continue a carregar, a ruptura física ocorre a uma deformação de aproximadamente 1000%. A geomembrana de PVC apresenta uma resposta relativamente uniforme, com a tensão crescendo gradualmente até a ruptura, a aproximadamente 480% de deformação.

São obtidos da curva tensão-deformação os seguintes dados quantitativos:

- Tensão na ruptura (última para o PVC e VLDPE, e de escoamento (*yield*) para o HDPE);
- Deformação na ruptura (usualmente chamada de alongamento na literatura de geomembranas);
- Tensão máxima ou última;
- Deformação correspondente;
- Módulos (a inclinação da porção inicial da curva tensão-deformação);

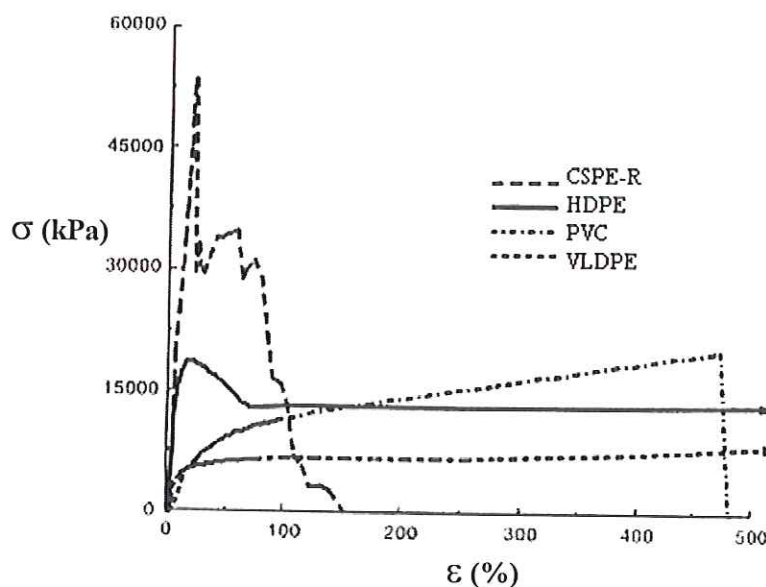


Figura 2.13. Resultados do ensaio de tração para várias geomembranas de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2.9, (KOERNER, 1997).

A Tabela 2.9 apresenta estes valores para os quatro materiais apresentados na Figura 2.13.

TABELA 2.9. Propriedades de acordo com o comportamento de tração para geomembranas de HDPE, VLDPE, PVC e CSPE-R, (KOERNER, 1997).

Dados do ensaio	Unidades	HDPE	VLDPE	PVC	CSPE-R
Tensão na ruptura	(MPa)	18,6	8,3	21,0	54,5
Deformação correspondente	(%)	17,0	500 ⁺	480	19
Módulos	(MPa)	330	76	31	330
Tensão última	(MPa)	13,8	8,3	20,7	5,7
Deformação correspondente	(%)	500 ⁺	500 ⁺	480	110

Espessuras: HDPE = 1,5 mm; VLDPE = 1,0 mm; PVC = 0,75 mm; CSPE-R = 0,91 mm.

Abreviações: ⁺ = não chega à ruptura

Ensaio de tração uniaxial em amostra faixa larga

Segundo KOERNER (1997), a maior crítica quanto às amostras utilizadas nos ensaios de tração, descritos anteriormente, está relacionada à contração (estreitamento) na região central que apresenta um comportamento unidimensional, o que não está de acordo com as situações de campo às quais as mantas estão sujeitas. Então são desejáveis ensaios

utilizando amostras bidimensionais com largura uniforme. A possibilidade de obter amostras amplas tem sido muito debatida. Amostras com larguras de 200 mm têm sido usadas para ensaios em geotêxteis e têm sido também adotados para ensaiar geomembranas (ver ASTM D 4885). A velocidade de deformação para ensaiar geomembranas, no entanto, é diferente da utilizada para ensaiar geotêxteis. A ASTM D 4885 recomenda usar 1.0 mm/min para ensaios em geotêxteis. Para uma amostra de geomembrana com 100 mm de comprimento e com 200% de deformação na ruptura o ensaio requereria 3,3 horas para ser completado. Considerando uma geomembrana com 1000% de deformação na ruptura (como é o caso do HDPE) o ensaio requereria 16,7 horas.

A Figura 2.14 apresenta curvas tensão *versus* deformação para quatro geomembranas as quais foram apresentadas na Figura 2.13, mas neste caso, para amostras com largura uniforme de 200 mm.

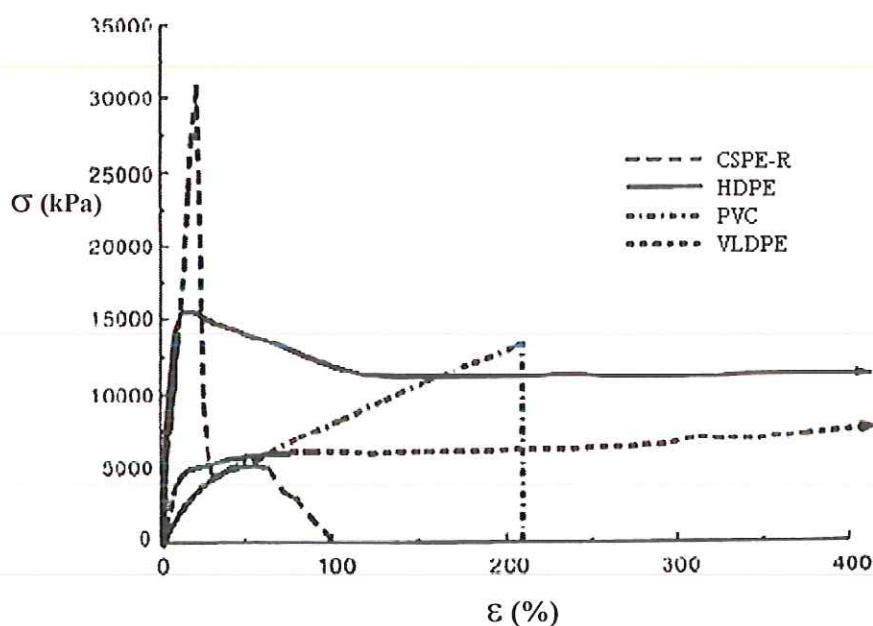


Figura 2.14. Resultados do ensaio de tração em amostras (faixa larga) de geomembranas de largura uniforme de 200mm de acordo com ASTM D 4885, (KOERNER, 1997).

A forma geral da curva para cada material é praticamente a mesma, porém os resultados de várias propriedades apresentam variações significativas. Estes resultados estão apresentados na Tabela 2.10. Pode-se observar que os ensaios utilizando amostras com larguras de 200 mm representam melhor as condições de campo, e por isto, apresentam resultados à tração mais orientados a projeto do que os resultados obtidos utilizando

amostras na forma “*dumbbell*” ou outras amostras que apresentem estreitamentos (unidirecionais).

TABELA 2.10. Propriedades de acordo com o comportamento de tração para geomembranas de HDPE, VLDPE, PVC e CSPE-R, (KOERNER, 1997).

Dados do ensaio	Unidades	HDPE	VLDPE	PVC	CSPE-R
Tensão na ruptura	(MPa)	15,9	7,6	13,8	31,0
Deformação correspondente	(%)	15	400 ⁺	210	23
Módulos	(MPa)	450	69	20	300
Tensão última	(MPa)	11,0	7,6	13,8	28
Deformação correspondente	(%)	400 ⁺	400 ⁺	210	79

Espessuras: HDPE = 1,5 mm; VLDPE = 1,0 mm; PVC = 0,75 mm; CSPE-R = 0,91 mm

Abreviações: ⁺ = não rompeu.

Ensaio de tração axi-simétrico

Existem situações nas quais o comportamento de tração da geomembrana mobiliza estados de solicitações não-planas. Deformações localizadas abaixo das geomembranas podem ser um destes casos. Este tipo de comportamento poderia ser melhor antecipado para geomembranas usadas em sistemas de cobertura de aterros sanitários. Estas são colocadas sobre o resíduo sólido que pode vir a apresentar recalques diferenciados. Esta situação é modelada colocando a geomembrana em um recipiente vazio, como está ilustrado na Figura 2.15.

Este ensaio está atualmente normatizado na ASTM D 5716. Os dados gerados de acordo com este ensaio são pressão *versus* deflexão do ponto central da amostra. Para obtenção da curva tensão-deformação (a qual é mais desejada), certamente algumas suposições precisam ser feitas. De acordo com o ensaio, observa-se que a geomembrana de HDPE e geomembranas reforçadas apresentam deflexões relativamente baixas, enquanto geomembranas como as de PVC apresentam deflexões relativamente altas.

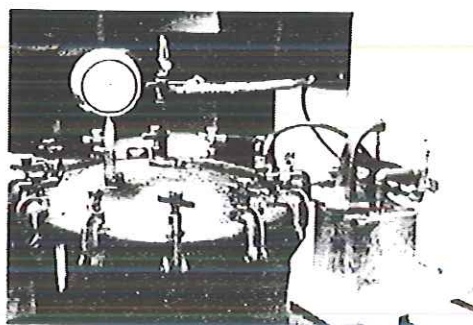
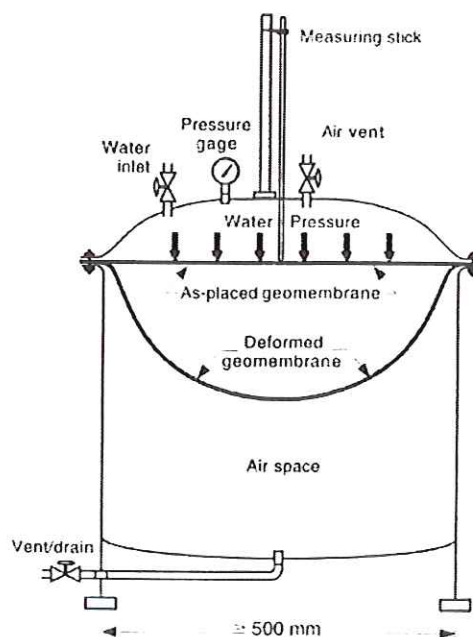


Figura 2.15. Diagrama esquemático do aparelho do ensaio de tração axi-simétrico, (KOERNER, 1997).

A Figura 2.16 apresenta curvas tensão-deformação obtidas usando um recipiente de diâmetro de 600 mm e velocidade de deformação de 7,0 kPa/min. Observa-se que tanto as geomembranas de HDPE como as de CSPE-R apresentam deformações relativamente baixas, para altas tensões, enquanto que as geomembranas de VLDPE e PVC apresentam deformações relativamente altas. Os resultados destes ensaios estão também na Tabela 2.11. Note-se que existe uma grande diferença entre os resultados obtidos neste ensaio e os métodos de ensaios apresentados anteriormente.

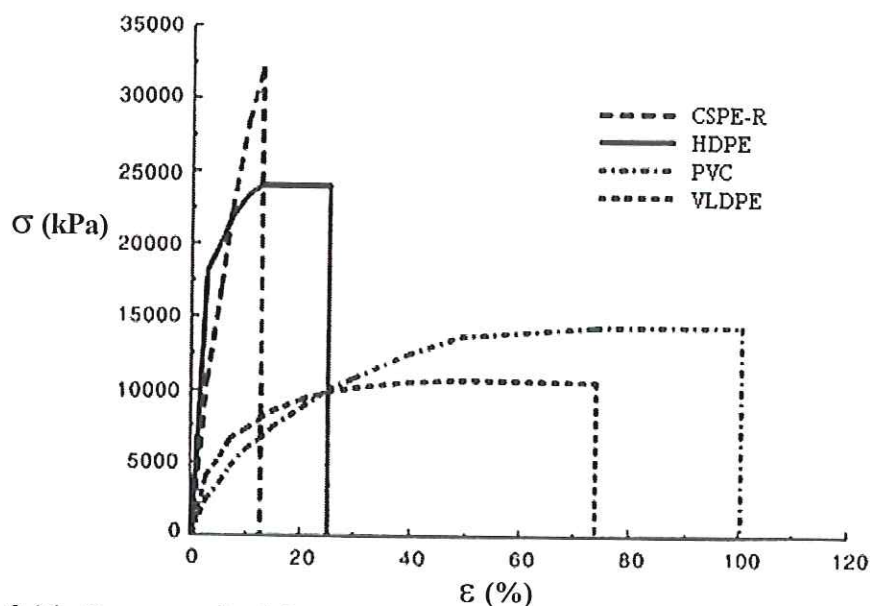


Figura 2.16. Curva tensão-deformação para vários tipos de geomembranas sob pressão hidrostática axi-simétrica, (KOERNER 1997).

TABELA 2.11. Propriedades em ensaio axi-simétrico de tração para geomembranas de HDPE, VLDPE, PVC e CSPE-R, (KOERNER, 1997).

Dados do ensaio	Unidades	HDPE	VLDPE	PVC	CSPE-R
Tensão na ruptura	(MPa)	23,5	10,3	14,5	31,0
Deformação correspondente	(%)	12	75	100	13
Módulos	(MPa)	720	170	100	350
Tensão última	(MPa)	23,5	10,3	14,5	31,0
Deformação correspondente	(%)	25	75	100	13

Espessuras: HDPE = 1,5 mm; VLDPE = 1,0 mm; PVC = 0,75 mm; CSPE-R = 0,91 mm,.

2.6.1.5 Flexibilidade a baixa temperatura

Uma publicação da *European Union for Technical Agreement in Construction* (UEAtc, 1992) propõe um procedimento particular na evolução da flexibilidade a baixas temperaturas, especialmente para geomembranas betuminosas:

A amostra é fletida a 180 °C em volta de um cilindro apresentando as características abaixo:

- 20 mm de diâmetro se a espessura da amostra for < 5 mm;
- 30 mm de diâmetro se a espessura da amostra for > 5 mm.

O tempo de flexão da amostra é de cinco segundos. O ensaio é conduzido em um ambiente onde a temperatura é diminuída de 5 em 5 °C. A temperatura na qual a amostra apresentar fissuras quando fletida é registrada.

O ensaio é usado como ensaio de identificação e para estimar a possível velocidade de envelhecimento do material.

Informações a respeito do comportamento de flexibilidade da geomembrana a baixa temperatura também podem ser obtidas de acordo com procedimento descritos nas normas: NFT 54110, DIN 53372 (apenas para geomembranas de PVC), ASTM D 1790 – 83 e ASTM D 746 – 79 (métodos de impactos) e ASTM D 2136 – 84 (método de flexão).

2.6.1.6 Espectroscopia Infra-Vermelho (IR)

A espectroscopia infravermelha, geralmente usada quanto à transformação de Fourier - *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), está baseada na concepção de que os grupos funcionais nas moléculas estão sempre em movimento (pulso). Durante uma análise FTIR, a amostra polimérica ensaiada é submetida à radiação. A frequência da radiação incidente ocorre na região infravermelha. Se a frequência igualar ao pulso (movimento) natural do grupo funcional, o polímero irá absorver essa energia e esta faixa absorvida aparecerá no propulsor de frequência do FTIR (KOERNER, 1997).

Segundo HALSE & RIGO (1991), a espectroscopia infra-vermelho (IR) é uma técnica usada para análise qualitativa e quantitativa de polímeros, permitindo identificar o grupo funcional específico no polímero, e determinar sua concentração.

Uma das aplicações desta técnica, em geomembranas, é para estudos térmicos e de fotodegradação nos polímeros que as constituem. Por exemplo, nas reações de oxidação em polietilenos forma-se o grupo carbonil (C=O), o qual tem uma faixa de absorção entre 1710 e 1735 cm^{-1} . O grau de oxidação do polímero pode ser obtido comparando a concentração do grupo carbonil do material intacto com o material exposto.

Este método pode ser usado, também, para avaliar a estabilização adequada no polietileno, além de ser comumente usado para identificar o tipo de plastificante usado no polímero após extração do solvente. O “IR” também pode ser usado para análise de materiais betuminosos.

A preparação da amostra é um importante passo para obter-se um bom e completo espectro. Para geomembranas de polietileno, as amostras podem ser na forma de filme. Uma outra alternativa são amostras na forma de pó, obtido moendo-se o material polimérico.

2.6.1.7 Análise Termo-Diferencial (DSC)

Segundo RIGO & CAZZUFFI (1991), na DSC uma pequena amostra de geomembrana é submetida a um fluxo térmico. Todo o fenômeno consiste na produção ou absorção de calor, apresentando pico endo ou exo-térmico no diagrama temperatura *versus* velocidade de fluxo térmico. A Figura 2.17 apresenta o diagrama qualitativo do ensaio DSC.

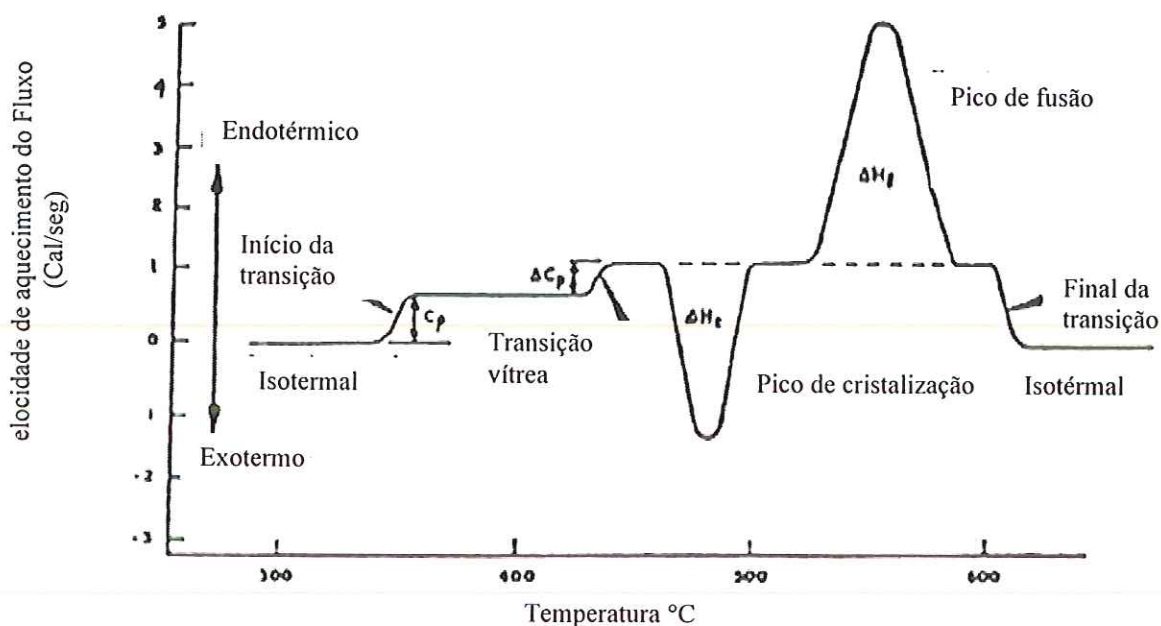


Figura 2.17. Diagrama qualitativo do ensaio DSC (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

A análise DSC oferece:

- Porcentagem de cristalinidade (ASTM D 3417-82) caso a geomembrana seja semi-cristalina;
- Temperatura de fusão (derretimento) (ASTM D 3417-82);
- Entalpia de fusão (derretimento) (ASTM D 3417-82);
- Temperatura de transição vítrea (ASTM D 3418-82);
- Pós-polimerização;
- Decomposição ou oxidação dos produtos;
- Estabilidade de oxidação.

De acordo com HALSE & RIGO (1994), o procedimento para realização do DSC consiste em tomar uma amostra pesando de 2 a 3 mg que é colocada em um recipiente saturado com nitrogênio em estado gasoso usando vazão de fluxo de 50 cm³/min. Para

geomembranas de polietileno, a amostra deve ser aquecida em condições adequadas que permitam atingir a temperatura de 200 °C, a uma velocidade de 20 °C por minuto para que se possa observar seu derretimento. Resinas de HDPE apresentam pico de derretimento simples a aproximadamente 128 °C, como está representado na Figura 2.18.

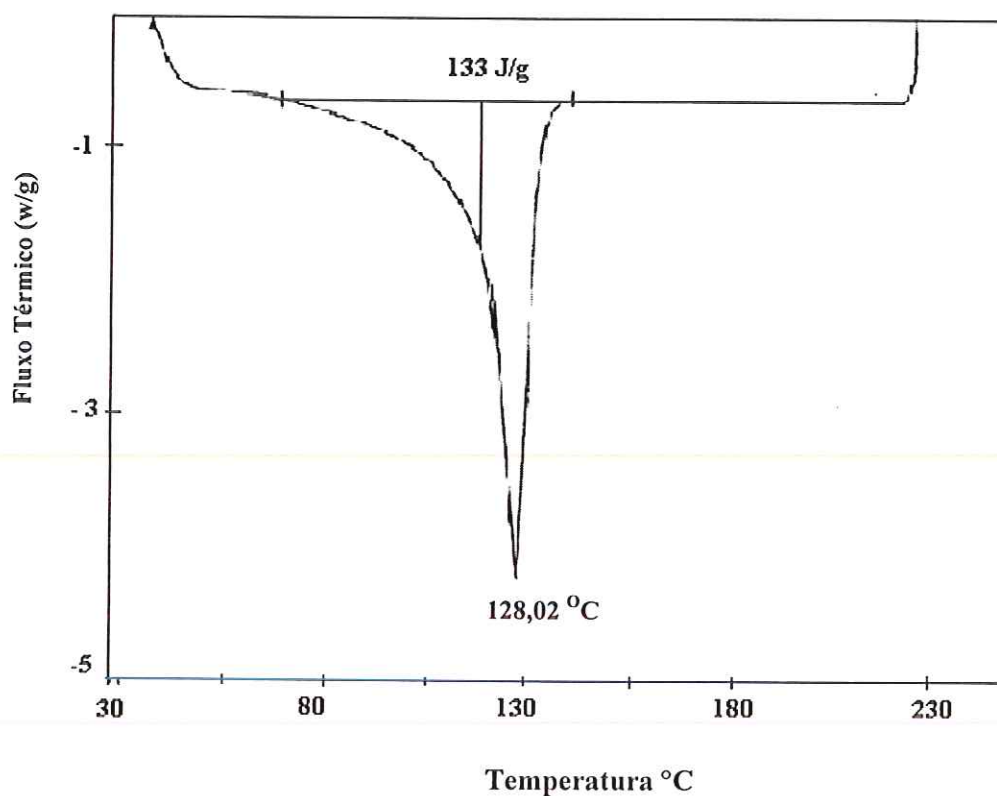


Figura 2.18. DSC termograma para geomembranas de HDPE (HALSE et al., 1991).

Algumas geomembranas como as de VLDPE, apresentam picos duplos de derretimento (às temperaturas de aproximadamente 102 °C e 118 °C), como ser observado na Figura 2.19. A presença de picos duplos pode ser causada por dois fatores: um é a natureza química do polímero, como por exemplo quando dois polímeros estão misturados ou quando se pode distinguir dois pesos moleculares diferentes. O outro fator é a recristalização do polímero durante a análise térmica.

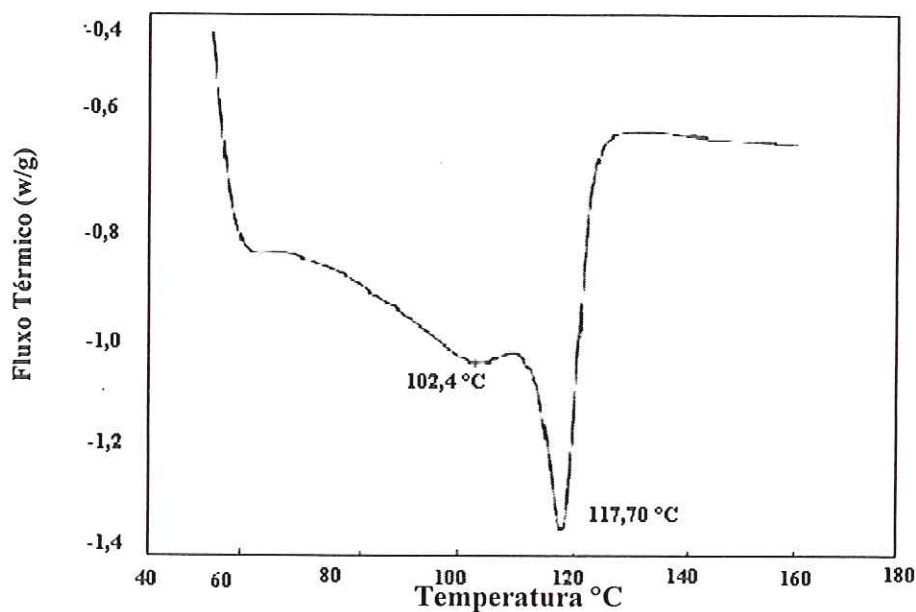


Figura 2.19. DSC termograma para geomembranas de VLDE (HALSE et al., 1991).

A Figura 2.20 apresenta o termograma da DSC para geomembrana de PVC. Existe um pico exotérmico à temperatura de 264 °C o qual ocorre devido a degradação dos estabilizastes. Seu valor máximo será variado para altas temperaturas quando a quantidade dos estabilizantes decresce (TURI, 1981). O pico máximo endotérmico a 323 °C é devido à deidroalogenação, que corresponde ao começo da degradação termal. (HALSE & RIGO, 1991).

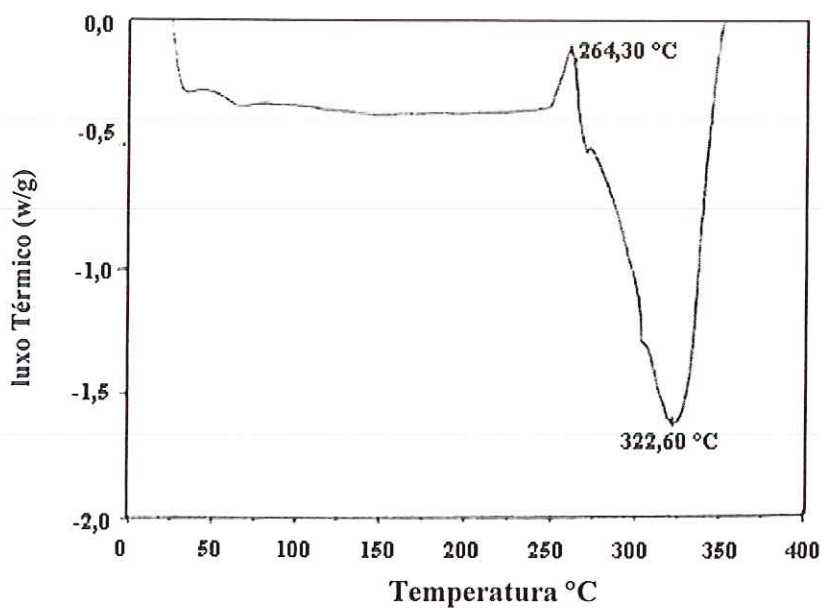


Figura 2.20. DSC termograma para geomembrana de PVC (HALSE et al., 1991).

2.6.1.8 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica é uma técnica termal dinâmica de avaliar a composição do material na qual a perda de peso de uma amostra é medida continuamente, enquanto a temperatura é aumentada em uma atmosfera inerte ou oxidada. Alternativamente, a perda de peso pode ser medida como uma função do tempo sob uma temperatura constante. O principal uso do TGA na aplicação para polímeros está no estudo da estabilidade e decomposição térmicas dos mesmos (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

Segundo HALSE & RIGO (1991) esta técnica permite obter informações de :

- Determinação do teor de voláteis, negro de fumo e cinza;
- Temperatura de decomposição para vários componentes da amostra;
- Determinação dos componentes químicos da amostra e de sua qualidade.

Resultados de TGA típicos para geomembranas de VLDPE e HDPE estão ilustradas na Figura 2.21. Ambas as curvas apresentam apenas uma resposta de decomposição simples, o que corresponde a separação da cadeia principal do polímero de polietileno. A temperatura que inicia o processo de separação para o VLDPE (465 °C) é apenas poucos graus abaixo da temperatura correspondente para o HDPE (471 °C), o que indica que a variação de densidade entre várias resinas de polietileno não afeta significativamente a temperatura de decomposição. O maior componente em ambos os polímeros é o polietileno (97,3 %). A maior porcentagem de resíduo é a de negro de fumo (2,4%). Quando introduz-se ar no dispositivo de ensaio o carbono é oxidado e determina-se o teor de cinza (3%).

Em contraste à resposta do PE, o PVC apresenta dois processos de decomposição, como pode ser observado na Figura 2.22, com temperaturas (iniciais) de 270 °C e de 352 °C. O primeiro processo inclui a deidroalogenação dos polímeros e a degradação dos plastificantes. O segundo processo corresponde à fase de degradação dos polímeros. Após o processo ser completado, introduz-se ar para oxidar o negro de fumo e a resina polimérica carbonácea. O resíduo final é a cinza que, de acordo com Figura 29, é igual à porcentagem de 6.7%.

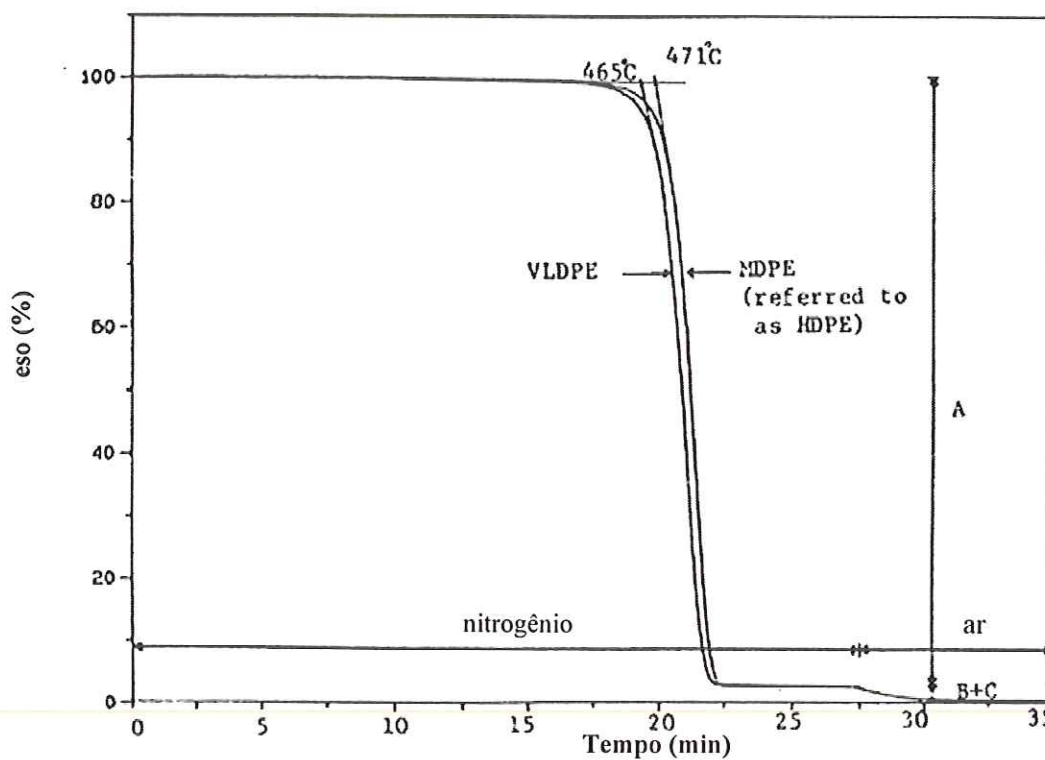


Figura 2.21. TGA - termograma para geomembranas de HDPE e VLDPE sob velocidade de aquecimento de 20 °C/min (HALSE et al., 1991).

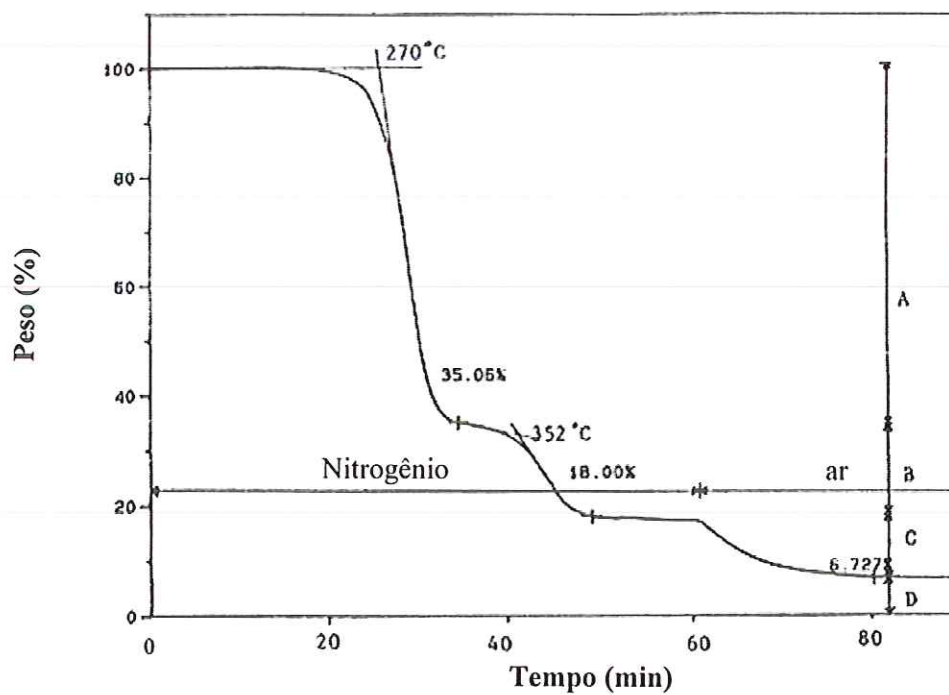


Figura 2.22. TGA - Termograma para geomembranas de PVC (HALSE et al., 1991).

2.6.1.9 Análise termomecânica (TMA)

A análise termomecânica ou “TMA” é a técnica na qual a deformação (mecânica) do material é medida sob aplicação de carregamento estático, submetido a um gradiente de temperatura controlado. Por esta razão o coeficiente de expansão térmica linear do material pode ser deduzido por este método (HALSE & RIGO, 1991).

De acordo com ABIGAIL (1992), esta técnica permite medidas típicas de:

- Penetração sob ação de carga (ponto de amolecimento);
- Coeficiente de expansão linear;
- Medidas de expansão e encolhimento de um material sob tensão;
- Resposta à tensão de monofilamento sob o efeito de uma carga;
- Dilatometria: expansão volumétrica de um material dentro de um outro meio (volume específico);

As medidas acima mencionadas são determinadas a uma temperatura fixa em função do tempo (medidas cinéticas).

A Tabela 2.12 apresenta valores do coeficiente de variação térmica linear para vários tipos de geomembranas poliméricas.

TABELA 2.12. Coeficiente de expansão térmica linear de geomembranas poliméricas, (HALSE & RIGO, 1991).

Geomembranas	Coeficiente de expansão linear (m/m/ °C x 10 ⁻⁵)
HDPE	11.0 – 13.0
MDPE	14.0 – 16.0
LDPE	10.0 – 22.0
PVC	25

2.6.1.10 Cromatografia

Segundo RIGO & CAZZIFFI (1991), a cromatografia é uma técnica que permite separar e determinar os diferentes componentes em uma mistura polimérica complexa (típica das geomembranas), quanto a voláteis e produtos em decomposição

A cromatografia pode ser realizada de acordo com duas diferentes técnicas:

- gás cromatográfico (GC) na qual a fase móvel apresenta-se no estado gasoso e;



- líquido cromatográfico a alta pressão (HPLC): na qual a fase móvel é líquida e a fase estacionária é líquida ou sólida.

KOERNER (1997), recomenda a utilização deste método para determinar a presença de plastificantes em geomembranas de PVC.

Segundo ABIGAILL (1992), as principais aplicações dessa análise para materiais poliméricos são:

- identificação dos polímeros;
- identificação de aditivos: plastificantes, estabilizantes, antioxidantes, etc...os quais devem ser extraídos dos polímeros para análise;
- análise quantitativa de impurezas.

2.6.1.11 Índice de fusão (ou fluidez) (MI) e Valor K

O ensaio de Índice de Fluidez ou “MI” é usado para medir a 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 & RIGO, 1991).

O ensaio de Índice de Fluidez é um ensaio importante para ser conduzido durante a fabricação do painel de geomembrana. Porém, não é um ensaio preciso para polímeros contendo plastificantes como o PVC. O ensaio determina a fluidez das membranas sob carga constante para empurrá-las através de um orifício normalizado. Um valor alto de MI 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 MI (SHARMA & LEWIS, 1994).

Como o valor do “MI” está qualitativamente relacionado ao peso molecular do polímero é considerado uma forma de avaliação indireta do peso molecular dos polímeros termoplásticos. Os valores do Índice de Fluidez devem ser comparados apenas entre diferentes amostras de um mesmo polímero. São obtidos segundo a especificação da ASTM D - 1238. 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 força a extrusão do polímero e da temperatura do cilindro (AGNELLI, 2001).

Neste ensaio pode-se também medir a Razão da Taxa de Fluxo – *Flow Rate Ratio* (FRR), isto é, a razão entre dois valores de “MI” obtidos sob pressões diferentes e na mesma temperatura. O valor do FRR indica a dispersão da curva de distribuição do peso molecular

do polímero. Para o polietileno o ensaio é realizado sob pressões de 5 kg e 2,16 kg e temperatura de 190 °C

Os resultados do ensaio são geralmente apresentados em gramas por 10 minutos, e o valor do “MI” para o PE esta geralmente compreendido entre 0,2 e 1,0 g/10 minutos e o FRR é da ordem de 2,5 g/10 minutos (KOERNER, 1997).

Segundo AGNELLI (1992), o ensaio correspondente para geomembranas que apresentam aditivos, como as geomembranas de PVC, é a determinação do Valor K. O valor K é calculado a partir de uma fórmula empírica constante da norma alemã DIN 53726. Esta norma é utilizada para especificar industrialmente as resinas de PVC. O valor K é calculado a partir de:

$$\log \eta_r = \left(\frac{75k^2}{1 + 1,5k * c} + k \right) * c$$

Onde:

η_r = viscosidade relativa

c = concentração da solução em g/100ml

(normalmente c = 0,5g/100ml = 0,5 %, solvente cicloexanona T = 25 °C)

Obtido k, tem-se que K = 1000k

Para o PVC, o valor K varia de 45 (PVC de baixo peso molecular) a 78 (PVC de alto peso molecular).

2.6.1.12 Extraíveis (*Extractables*)

O teor de “extraíveis” contido em uma geomembrana polimérica corresponde à fração da mistura que pode ser extraída da amostra de geomembrana por meio da escolha adequada de um solvente que nem decomponha nem dissolva a base do polímero. Os “extraíveis” compreendem plastificantes, óleo, etc.

A determinação do teor de “extraíveis” geralmente é feita através dos procedimentos descritos nas normas ASTM D 3421, para geomembranas de PVC e ASTM D 297 para geomembranas elastoméricas (SHARMA & LEWIS, 1994).

2.6.1.13 ASH (cinzas)

O teor de cinza na geomembrana é a fração inorgânica restante da amostra após remoção dos voláteis e processo de queima em forno a uma temperatura de 550 a 25 °C. A cinza consiste em ingredientes inorgânicos que têm sido usados como componente de preenchimento da mistura da resina que constitui o polímero. Os fabricantes de geomembranas apresentam formulações com composições diferentes e o teor de cinza faz parte dos métodos de análise da composição química das geomembranas poliméricas. O resíduo obtido através da análise do teor de cinza pode ser reaproveitado em outras análises necessárias para promover sua identificação.

O método de ensaio descrito na ASTM D 297-81 é geralmente recomendado para esta análise. O teor de cinza também pode ser determinado através do ensaio de TGA (RIGO & CAZZUFFI, 1991)

2.6.1.14 Dureza

Dureza é a habilidade do material em resistir a indentação de um pequeno corpo de forma e de dimensões padronizadas.

O ensaio de dureza é usualmente realizado de acordo com a ASTM D 2240 por meio de um aparato o qual apresenta dois tipos diferentes de corte (dependendo da deformabilidade do material) como esta ilustrado na Figura 2.23 (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

Embora não haja uma relação simples entre a dureza e as outras propriedades do material, a dureza pode ser relacionada ao módulo de elasticidade de acordo com formulações apresentadas na norma ASTM D 1415.

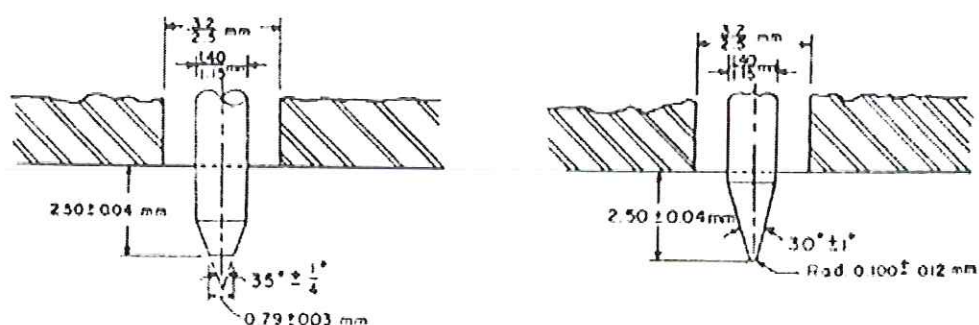


Figura 2.23. Indentadores para ensaio de dureza, de acordo com a ASTM D 2240.

2.6.1.15 Teor de negro de fumo (principalmente para o HDPE)

Negro de fumo é adicionado à geomembrana para aumentar sua resistência aos raios UV. Para checar a quantidade certa de teor de negro de fumo e sua dispersão na geomembrana, tanto o ensaio de teor de negro de fumo como o ensaio de dispersão de negro de fumo são realizados.

O ensaio de teor de negro de fumo mede a porcentagem de negro de fumo adicionado à geomembrana por meio de seu aquecimento até que sobre apenas o negro de fumo. Este ensaio não é recomendado para materiais que contenham outros materiais de preenchimento além do negro de fumo, como o PVC. Neste caso recomenda-se a realização da TGA

Para geomembranas de HDPE a porcentagem de negro de fumo é tipicamente de 2 a 3% e para geomembranas de PVC o limite aceitável é entre 10 e 15 % (SHARMA & LEWIS, 1994).

RIGO & CAZZUFFI (1991), recomendam a ASTM D 1603-76 a qual descreve o procedimento para a determinação do teor de negro de fumo para polietileno, polipropileno e polibutileno.

2.6.1.16 Dispersão de negro de fumo (geralmente para HDPE)

A ASTM D 3015-78 descreve a análise microscópica do material polimérico para checar a qualidade da dispersão do pigmento.

Este método pode ser usado para medir o grau de dispersão dos pigmentos, a presença de substâncias externas, pontos da resina sem pigmentação e degradação da resina (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

Segundo SHARMA & LEWIS (1994), um baixo teor de negro de fumo pode reduzir a resistência aos raios UV, a resistência contra o surgimento de fissuras e pode também reduzir as propriedades de tração.

2.7. Ensaio de caracterização

Os ensaios de caracterização propriamente dita, cobrem três diferentes aspectos:

- Ensaio de caracterização da geomembrana;
- Ensaio de caracterização das emendas;
- Ensaio de durabilidade.

2.7.1 Ensaios de caracterização de geomembranas

Os ensaios de caracterização de geomembranas procuram demonstrar a habilidade da manta em exercer sua função de impermeabilização quando submetidas a tensões '*in situ*', sob as variadas condições do meio ambiente. Estes ensaios são constantes da: determinação das resistências ao rasgo, ao estouro, à punção. Determina-se ainda a aderência, fluência, expansão térmica, estabilidade dimensional e a permeabilidade à água e ao vapor.

2.7.1.1 Resistência ao Rasgo

Durante a instalação das geomembranas, estas podem rasgar devido a ventos fortes ou a outro dano qualquer de instalação, pois a resistência ao rasgo para muitas geomembranas não-reforçadas é muito baixa, geralmente entre 18 e 130N. Isto implica cuidados especiais de instalação e manuseio das geomembranas (KOERNER, 1997).

Existem várias maneiras de realizar o ensaio de resistência ao rasgo. Segundo SHARMA & LEWIS (1994), a determinação da resistência ao rasgo usando a norma ASTM D 1004 é o método mais comum em geomembranas termoplásticas.

De acordo com RIGO & CAZZUFFI (1991), as dimensões das amostras utilizadas no ensaio de resistência ao rasgo dependem do material constitutivo e do tipo de ensaio considerado.

Para geomembranas poliméricas, a resistência ao rasgo pode evoluir de acordo com duas abordagens diferentes: o rasgo inicial e a propagação do rasgo.

No que se refere à determinação da resistência ao rasgo inicial, o ensaio pode ser realizado de acordo com a norma ASTM D 1004 para geomembranas termoplásticas e ASTM D 624 (DIE C) para geomembranas elastoméricas.

KOERNER (1997), recomenda a determinação da resistência ao rasgo das geomembranas através das normas ASTM D2263, D1004, D2261 e D1938 as quais cobrem os tópicos gerais.

A Tabela 2.13 apresenta valores de resistência ao rasgo oferecidos por fabricantes de geomembranas para vários tipos de geomembranas.

TABELA 2.13. Intervalos típicos de resistência ao rasgo para várias geomembranas, ensaiadas de acordo com a norma ASTM D 1004 (SHARMA & LEWIS, 1994).

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

2.7.1.2 Estouro

O ensaio de resistência ao estouro reproduz em laboratório as condições de tensão-deformação em geomembranas submetidas a tensões axi-simétricas em três dimensões, devido, por exemplo, a deformações localizadas abaixo das barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários.

O processo usual do ensaio consiste em instalar uma amostra circular de geomembrana no topo de um recipiente metálico como esta ilustrado na Figura 2.24. Aplica-se pressão de água ou ar sobre a amostra até que esta estoure. A pressão é aplicada em etapas e mede-se a deformação correspondente a cada aplicação de pressão.

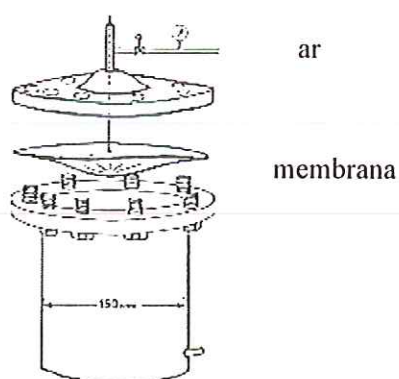


Figura 2.24. Aparato utilizado no ensaio de resistência ao estouro usado na Escola Politécnica de Montreal (ROLLIN et al., 1984).

Segundo HOEKSTRA (1991), durante os últimos 5 anos muitos países têm avaliado equipamentos que simulem de forma mais precisa as situações de campo utilizando amostras com diâmetros variados. A tendência é usar aparelhos maiores com amostras de diâmetros superiores a 500 mm.

Os resultados obtidos em ensaios realizados em equipamentos propostos por vários laboratórios deixam claro que todos os valores de tensão-deformação obtidos em amostras com diâmetro de 50 mm são maiores que aqueles obtidos em amostras de diâmetros de 500 mm. De acordo com resultados de ensaios realizados em amostras com 1000 mm de diâmetro, constatou-se que apenas a parte central da amostra com raio entre 200 e 300 mm participa do processo de estouro. Então, recomenda-se a utilização de amostra com diâmetro de aproximadamente 500 mm considerando que esta dimensão de amostra simula de forma mais aproximada o comportamento da geomembrana na prática.

A Tabela 2.14 apresentam resultados de ensaios de resistência ao estouro, em amostras de vários tamanhos e espessuras, para geomembranas que apresentam ponto de escoamento (HDPE) e para as que não apresentam ponto de escoamento (PVC), respectivamente, de acordo com dados obtidos em vários laboratórios apenas com o objetivo de comparação. Estes dados confirmam que não há redução significativa nos valores de deformação de escoamento devido ao aumento do diâmetro da amostra acima de 500 mm.

TABELA 2.14 Características de resistência ao estouro para geomembranas de HDPE e PVC, (HOEKSTRA, 1991).

Geomembrana Tipo (espessura)	Condições de ensaio		Resultados dos ensaios	
	Diâmetro da amostra	Laboratório	Tensão no escoamento (MPa)	Deformação no escoamento (%)
HDPE				
1.0 mm	610 mm	GRI	20,0	10,0
2.0 mm	100 mm	Steffen	17,0	10,0
2.5 mm	250 mm	Steffen	14,0	15,4
2.7 mm	500 mm	Steffen	15,4	15,0
2.7 mm	100 mm	Steffen	16,3	9,9
2.0 mm	100	STUVA	16,0	12,0
2.0 mm	Frame	STUVA	18,0	12,0
2.0 mm	500	Steffen	18,0	18,7
PVC				
1.2 mm	50	CEMAGREF	8,3	135,0
1.2 mm	500	AIS	7,3	115,0
2.0 mm	100	Steffen	6,0	55,0
0.5 mm	610	GRI	6,0	75,0

2.7.1.3 Resistência à Punção

De acordo com FROBEL & RIGO (1991), entre as propriedades das geomembranas a resistência ao puncionamento é uma das mais depreciadas e o método de ensaio é um dos menos detalhados. Porém, se considerada a relevância da integridade da geomembrana quanto à vida útil de sistemas de contenção, especialmente contenção de resíduos, fica claro a necessidade de poder-se estimar a resistência ao puncionamento das geomembranas.

As geomembranas geralmente são colocadas abaixo ou acima de materiais contendo bordas angulares ou dentadas. No caso de sistemas de contenção de resíduos, camadas drenantes constituídas de solos granulares costumam ser colocadas acima das geomembranas. As cargas provocadas pela presença de equipamentos ou pelo próprio depósito de resíduos, quando transmitidas à camada drenante, podem vir a causar o puncionamento da geomembrana levando a abertura de brechas no sistema de contenção. Então, a resistência ao puncionamento da geomembrana é extremamente importante uma vez que possíveis reparos posteriores são altamente dispendiosos (SHARMA & LEWIS, 1994).

Segundo KOERNER (1997), a ASTM D 5494, é a norma que melhor modela esta situação, através de um ensaio de puncionamento em forma de pirâmide. Como alternativa pode ser usada a ASTM D 4833, desde que os resultados dos ensaios sejam usados com o propósito de controle de qualidade de fabricação. Neste ensaio a amostra é colocada em um molde cilíndrico vazio de 45 mm de diâmetro. Esta montagem é então levada a uma prensa de ensaio de compressão. Uma barra de 8 mm de diâmetros com a extremidade do fundo chanfrada é pressionada no centro da geomembrana até provocar seu puncionamento. 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, são 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 Figura 2.25 apresenta resultados de ensaios de puncionamento para geomembranas de HDPE com diferentes espessuras e em diferentes combinações com geotêxteis.

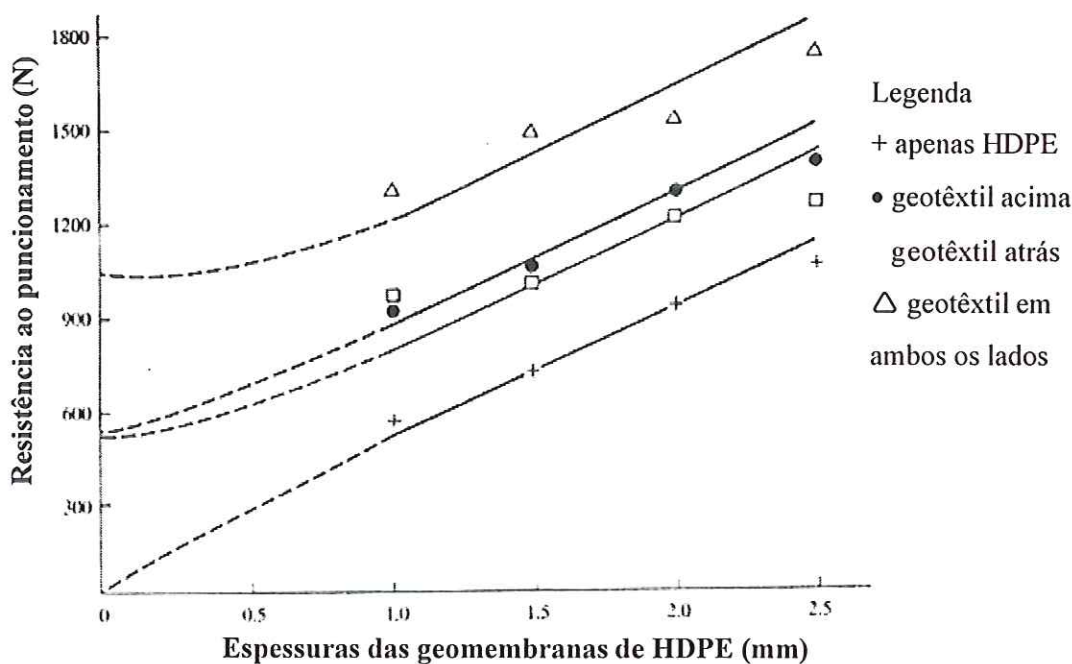


Figura 2.25. Resultados do ensaio à punção em várias geomembranas de HDPE e em geomembranas de HDPE combinadas a geotêxteis (KOERNER, 1997).

Os ensaios listados acima são considerados ensaios índices devido ao fato de serem realizados em amostras de dimensões relativamente pequenas e de não haver relação aceitável entre os valores obtidos nos ensaios e o comportamento real de campo. Estes ensaios podem, no entanto, oferecer valores de resistência ao punçamento em termos de comparação entre diferentes tipos de geomembranas. A Tabela 2.15 apresenta valores de resistência ao punçamento para várias geomembranas baseados na norma da ASTM D 4833, (SHARMA & LEWIS, 1994).

TABELA 2.15. Resultados típicos de ensaios ao punçamento para várias geomembranas poliméricas, (SHARMA & LEWIS, 1994).

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

Segundo SPARGUE & FROBEL (1990), a ruptura por punção ocorre no campo devido a dois mecanismos: punção da zona 1 e punção da zona 2, como esta ilustrado na Figura 2.26. O ensaio de punção usado em projeto deve então simular ambos os mecanismos.

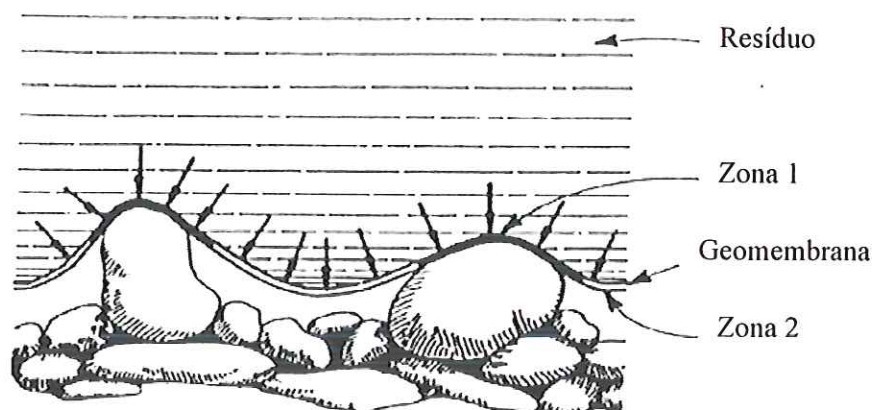


Figura 2.26. Mecanismos de deformação de geomembranas sob carga pontual (SPRAQUE & FROBEL, 1990).

8.2.1.4 Aderência

Em muitas aplicações, como em sistemas de impermeabilização lateral de aterros sanitários, as geomembranas são instaladas em superfícies inclinadas, onde componentes de forças gravitacionais agirão no plano da geomembrana podendo levar ao deslizamento da superfície inclinada. Consequentemente é importante poder avaliar o comportamento de interface geomembrana-superfície inclinada (INGOLD, 1991).

De acordo com RIGO & CAZZUFFI (1991), a aderência entre diferentes materiais que constituem um sistema impermeabilização (solo, geomembrana, geotêxtil, geocomposto, etc) pode ser estudado usando um equipamento de ensaio de cisalhamento direto.

Muitas pesquisas têm sido realizadas no estudo do atrito geomembrana –solo e têm-se utilizados 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 como está ilustrado na Figura 2.27.

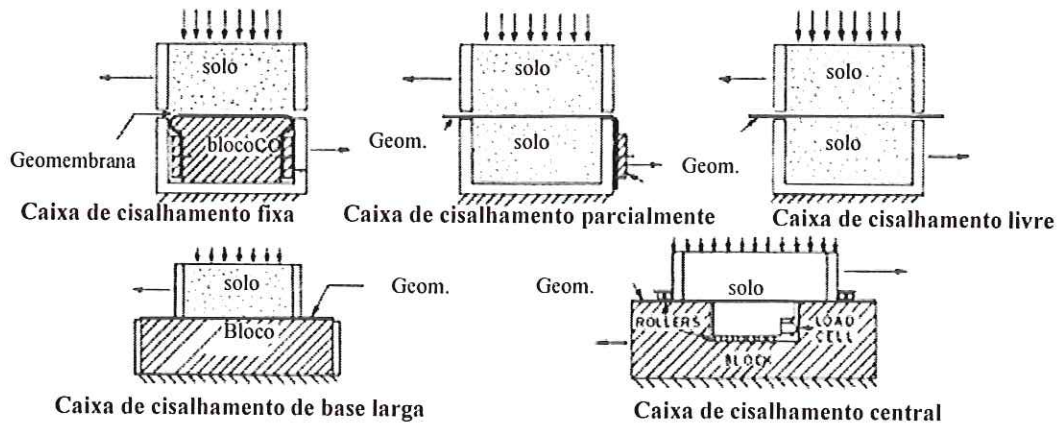


Figura 2.27. Tipos de aparelhos de ensaios de cisalhamento direto, (INGOLD, 1991).

Muitos pesquisadores têm investigado as propriedades de aderência de interface entre solo-geotêxtil, solo-geomembrana e geomembrana-geotêxtil. A resistência ao cisalhamento devido ao atrito do solo é definida de acordo com os parâmetros de resistência convencionais, c' e ϕ' , onde c' corresponde ao intercepto de coesão efetiva e ϕ' ao ângulo de atrito interno do solo. Os parâmetros correspondentes na análise de aderência solo-geomembrana ou solo-geotêxtil são $c_a = \alpha c'$ e δ' . Onde 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). A Tabela 2.16 apresenta parâmetros de aderência usando o método de cisalhamento direto.

TABELA 2.16. Aderência para geomembranas (WILLIAMS & HOULIHAN, 1987).

Geomembranas	HDPE		PVC	
	δ' (°)	$C_a = \alpha c'$ (kPa)	δ' (°)	$\alpha c'$ (kPa)
Areia	19	0,8	26	0,3
Cimento-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

O tamanho da caixa de cisalhamento deve ser função do tipo de solo no qual a geomembrana está instalada. Para ensaios de interface geomembrana-areia, silte ou argila, recomenda-se uma caixa de 100 x 100 mm. Apenas quando se está avaliando a interface geomembrana-pedregulho (ou outro material constituído por partículas grandes) é que necessita-se de uma caixa de cisalhamento grande. A Tabela 2.17 apresenta resultados de trabalhos enfocando a determinação dos valores de pico do atrito.

TABELA 2.17. Valores de pico do atrito geomembranas/ solo, (KOERNER, 1997).

Ângulo de atrito solo-geomembrana						
Geomembrana	Tipo de solo					
	Areia-cimento ($\phi = 30^\circ$)		Areia de Ottawa ($\phi = 28^\circ$)		Areia xistosa micácea ($\phi = 28^\circ$)	
HDPE (lisa)	18°	(0,56)	18°	(0,61)	17°	(0,63)
PVC (rugoso)	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 (liso)		PVC (rugoso)		PVC (liso)	
Não tecido agulhado	8°		23°		21°	
Não tecido aquecido	11°		20°		18°	
Monofilamento tecido	6°		11°		10°	
Tecido	10°		28°		24°	
Ângulo de atrito geotêxtil-solo						
Geotêxtil	Solo					
	Areia-cimento		Areia de Ottawa		Areia xistosa micácea	
Não tecido agulhado	30°	1,0	26°	(0,92)	25°	(0,96)
Não tecido aquecido	26°	0,84	-	-	-	-
Monofilamento tecido	26°	0,84	-	-	-	-
Tecido	24°	0,87	24°	(0,84)	23°	(0,87)

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

2.7.1.5 Fluência (*Creep*)

Materiais poliméricos têm uma alta tendência ao “*creep*” sob carga constante, principalmente se comparados a materiais de construção tradicionais. As propriedades de viscoelasticidade dos polímeros como as geomembranas, foram revistos por GAMSKI (1984).

De acordo com RIGO & CAFFUZZI (1991), o comportamento de *creep* geralmente resulta em uma das três diferentes curvas deformação *versus* tempo. Estas curvas qualitativas estão ilustradas na Figura 2.28.

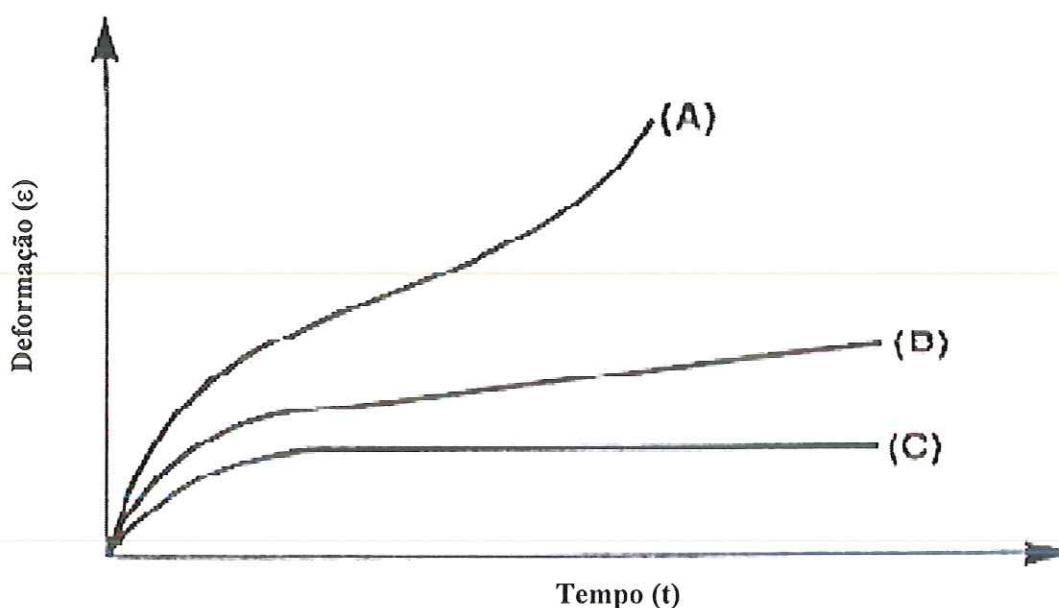


Figura 2.28. Tipos de comportamento de creep (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

A curva “A” descreve a ruptura por *creep*;

A curva “B” mostra um comportamento de *creep* após deformação inicial;

A curva “C” a não ocorrência de *creep* após deformação inicial.

Para simulação do comportamento da geomembrana “*in situ*” a amostra ensaiada precisa ser avaliada sob algum tipo de confinamento. Estes trabalhos têm progredido na avaliação do comportamento do polímero sob tensão constante ou deformação constante tanto em geotêxtil como em geogrelha.

Geomembranas, ao contrário de geogrelhas e geotêxteis, são raramente projetadas como elementos estruturais, destinados a suportar cargas. O comportamento desejado para geomembranas é a deformação sem ruptura. Conseqüentemente, a habilidade das geomembranas de alongar sem romper é um parâmetro importante. No entanto o fato das

geomembranas não serem projetadas como elementos estruturais não significa que, uma vez instaladas, não possam estar sujeitas a suportar cargas. A resposta da geomembrana neste caso é dependente de vários fatores, incluindo as condições de contorno de tensão-deformação, velocidade de carregamento, substâncias químicas presentes no meio e da temperatura. Este assunto foi detalhadamente estudado por GIROUD & BEECH, 1989, KOERNER & HWU, 1991; e MERRY & BRAY, 1997.

Segundo MERRY & BRAY (1997), as geomembranas podem ser submetidas a uma grande variação de temperatura, além de tensões induzidas por recalques diferenciais, principalmente quando instaladas em obras de contenção de resíduos. Consequentemente, entender o comportamento das geomembranas quanto a tensão-deformação-tempo-temperatura é uma importante consideração de projeto.

Para avaliar o comportamento de uma geomembrana de HDPE quanto ao creep, foi realizado um estudo utilizando equipamento de ensaio de tração mutiaxial para aplicação de carga. O ensaio teve duração de 36 horas, com variação de tensão entre 2 e 15 MPa e temperatura entre 2 °C e 53 °C. Os resultados do ensaio indicaram que o aumento da temperatura causa um amolecimento significativo na geomembrana, e que a baixas temperaturas a geomembrana pode parecer estável submetida a uma certa carga, no entanto para altas temperaturas e mesma carga pode romper por “*creep*”.

2.7.1.6 Expansão térmica

Alguns tipos de materiais poliméricos apresentam um importante comportamento de expansão térmica.

O coeficiente linear de expansão térmica é determinado pela medida das dimensões da amostra quando esta é submetida a um aumento ou a uma diminuição de temperatura.

A norma recomendada é a ASTM D 697 (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

De acordo com KOERNER (1997) existe um grande número de procedimentos para a determinação do coeficiente de expansão ou contração térmica do material como, por exemplo, as ASTM D 2102 e D 2259 para contração e ASTM D1042 e ASTM D 1204 para expansão e mudanças de dimensão. A Tabela 2.18 apresenta alguns valores típicos do coeficiente de expansão térmico para algumas geomembranas poliméricas.

TABELA 2.18. Coeficiente linear de expansão térmica (KOERNER, 1997).

Tipo de polímero	Expansão térmica linear ($\times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$)
HDPE	11-13
MDPE	14-16
LDPE	10-12
VLDPE	15-25
Polipropileno	5-9
PVC sem plastificante	5-10
PVC com 35% de plastificante	7-25
Poliamida	-
Nylon 6	7-9
Nylon 66	7-9
Poliestireno	3-7
Poliéster	5-9

2.7.1.7 Estabilidade dimensional

Altas temperaturas podem causar encolhimento (redução) ou distorção devido ao relaxamento da tensão interna. A norma recomendada para mudanças nas dimensões lineares da amostra (250x250 mm) quando submetidas a um processo de aquecimento a uma temperatura de 100°C sob um determinado tempo é a ASTM D 1204

2.7.1.8 Ensaio de permeabilidade da água

Na determinação da permeabilidade da geomembrana à água, utiliza-se uma amostra de geomembrana com área "A" submetida a um fluxo de água com gradiente hidráulico 'i'.

A Figura 2.29 apresenta o esquema usado para medir a avaliação da permeabilidade em geomembranas.

Uma amostra circular de geomembrana (diâmetro de 100 mm) é colocada acima de uma fina camada de areia. Aplica-se pressão de água, aproximadamente 1300 kPa, na superfície (superior) da geomembrana. A geomembrana deve estar primeiro em contato com a água por 24 horas. A vazão é então determinada medindo a variação do nível de água no tubo vertical graduado (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

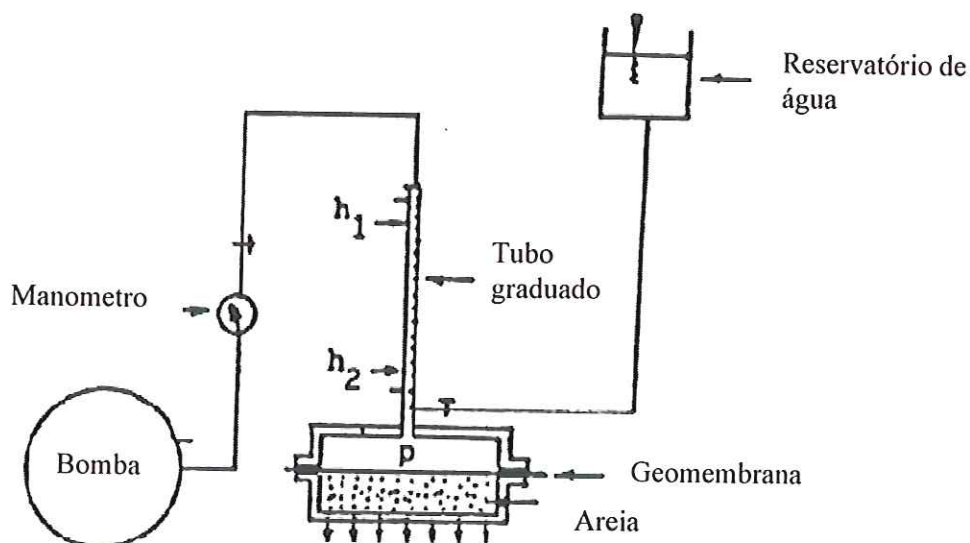


Figura 2.29. Esquema do equipamento utilizado no ensaio de permeabilidade (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

De acordo com KOERNER (1997), nenhum material é absolutamente impermeável, e a taxa de permeabilidade relativa das geomembranas é muito discutida. Os ensaios são adaptações de ensaios usados em engenharia geotécnica, medindo a permeabilidade da água através da geomembrana. No entanto, isto pode ser impraticável. Em muitos casos, a carga hidráulica requerida costuma ser muito alta podendo ocorrer vazamentos ou problemas na própria amostra que podem causar variações nos resultados. Sob cargas hidráulicas baixas, o tempo de ensaio é muito longo, podendo ocorrer a evaporação da água. Então, uma análise diferente é feita usando vapor d'água.

2.7.1.9 Ensaio de permeabilidade de vapor

Alguns métodos de avaliação da permeabilidade ao vapor são baseados na lei da difusão. De acordo com a proposta apresentada na norma da ASTM E 96-80, uma amostra circular de geomembrana é colocada no topo de uma caixa, parcialmente preenchida com água, vedada com parafina para garantir que a água não evapore pela junta geomembrana-caixa, e sim através da geomembrana. A caixa é então virada de cabeça para baixo, de modo que a geomembrana esteja em contato com a água, de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.30.

O ensaio é realizado a uma temperatura de 23 °C e umidade relativa de 50%. O peso da caixa é medido regularmente permitindo determinar a quantidade de água que foi perdida

através da geomembrana. O tempo requerido para o ensaio é de aproximadamente 30 dias (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

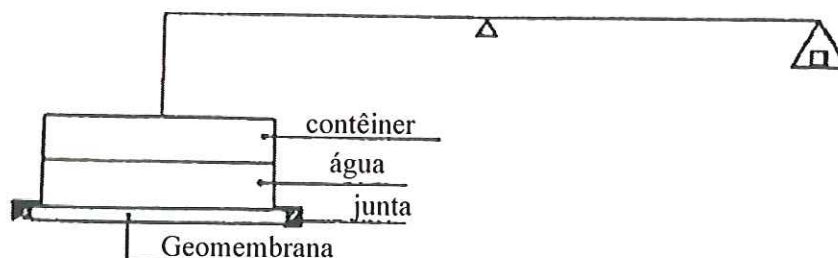


Figura 2.30. Esquema do aparelho utilizado no ensaio de permeabilidade (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

Uma análise detalhada da permeabilidade de geomembranas quanto a vapor, água, ou outros fluidos foi realizada por HAXO & PIERSON (1990).

2.8 Ensaios de Durabilidade

A aceleração de processos de envelhecimento, promovendo o aumento de concentrações químicas, temperatura e tensões vêm sendo aplicada nas análises de ensaios de laboratório. Deve-se fazer a ressalva que o processo de envelhecimento é influenciado pelos parâmetros ambientais. Apesar disso, os ensaios acelerados apresentados dão informações preciosas sobre a sensibilidade das geomembranas quanto aos agentes de envelhecimento. Os ensaios acelerados são constantes da determinação de: voláteis, abrasão, envelhecimento térmico, exposição à luz, resistência biológica, envelhecimento devido à presença de SO_2 , envelhecimento devido à presença de ozônio, *stress-creacking*, resistência química e tempo de indução à oxidação-OIT. É necessário que se identifique os fenômenos que possam vir a causar a divisão da cadeia polimérica ou a quebra de vínculo da estrutura dos polímeros constituintes das geomembranas, assim como a existência de algum tipo de dano que possa comprometer sua eficiência a longo prazo (KOERNER, 1997).

O objetivo dos ensaios de durabilidade é controlar a habilidade das geomembranas, ou dos sistemas incluindo todas as geomembranas, em resistir às solicitações em longo prazo. Em geral estas solicitações são de origem mecânica, química, física ou biológica, podendo agir separadas ou em combinação.

Após o envelhecimento as características dos materiais constituintes das geomembranas são checadas de acordo com os ensaios de identificação e comportamento descritos anteriormente (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

Para POHL & WESTON (1992), na análise de durabilidade a longo prazo das geomembranas é necessário que se realize ensaios de radiação UV, agressão pela presença de substâncias químicas, expansão térmica, volatilização e oxidação.

De acordo com KOERNER (1997), as propriedades das geomembranas que serão monitoradas quanto a algum tipo de degradação a longo tempo são: decréscimo de alongação na ruptura, aumento do módulo de elasticidade, aumento (ou diminuição) da resistência (tensão de ruptura) e diminuição da ductibilidade. Obviamente muitas propriedades físicas e mecânicas mencionadas anteriormente podem ser usadas no processo de monitoramento de degradação de materiais poliméricos.

2.8.1 Voláteis

A determinação de voláteis é geralmente o primeiro ensaio de durabilidade realizado em uma amostra de geomembrana exposta, e recomenda-se que seja realizado o mais rápido possível após amostragem.

O ensaio indica a quantidade de materiais voláteis que foram perdidos pela geomembrana durante exposição.

A fração de voláteis é definida como o peso perdido pela amostra de geomembrana quando aquecida em um forno com circulação de ar a uma temperatura de 105°C por duas horas. Recomenda-se usar amostras em forma de disco com diâmetro de 50 mm.

Voláteis devem ser removidos antes da determinação do teor de cinza, extraíveis e densidade, (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

2.8.2 Abrasão

Em algumas aplicações (como túneis e canais de hidrelétricas) as geomembranas podem estar sujeitas a abrasão devido ao contato com areia ou pedregulhos presentes na água.

De acordo com CAZZUFFI, et al., (1996), a amostra de geomembrana deve ser colocada em um tambor giratório (Figura 2.31) parcialmente preenchido com água e areia controlando-se a medida do peso.

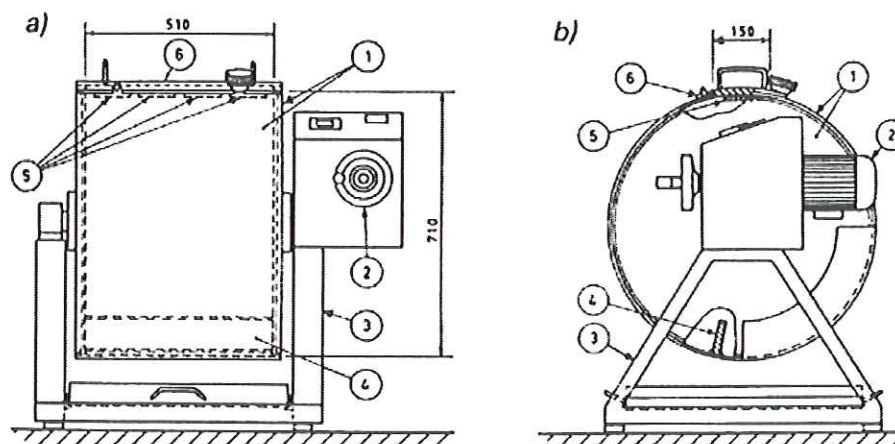


Figura 2.31. Ensaio de abrasão em geomembranas (CAZZUFFI, et, al., 1983).

- a) Vista lateral;
- b) Vista frontal;
- 1) Tambor de aço;
- 2) Motor
- 3) Suporte;
- 4) Suporte de aço para misturas as partículas de solo;
- 5) Amostra de geomembrana;
- 6) Tampa.

Ensaio mais tradicionais também podem ser usados na realização do ensaio de abrasão em condições secas de acordo com a ASTM D 4060 e ASTM D 2228.

2.8.3 Envelhecimento térmico

As geomembranas podem estar sujeitas a altas temperaturas durante armazenamento, instalação ou durante sua vida útil. Geomembranas termoplásticas são armazenadas em rolos ou painéis e se expostas ao calor durante este período podem apresentar fissuras que venham a comprometer sua servibilidade.

Para avaliar o envelhecimento térmico, amostras para o ensaio de tração devem ser colocadas por 15 dias, 1, 2, 3, 4, ou 6 meses em um forno a 80 °C. A resistência à tração é medida no término do tempo de exposição de acordo com as especificações da UEAtc (UEAtc, 1982). Um procedimento similar de envelhecimento térmico é apresentado pela ASTM D 573 (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

Segundo KOERNER (1997), várias propriedades das geomembranas poliméricas são sensíveis a mudanças de temperatura. Tanto temperaturas altas quanto baixas podem causar mudanças únicas nas propriedades das geomembranas.

Considerando altas temperaturas, as geomembranas expostas ao calor podem ser submetidas a mudanças nas suas propriedades físicas, mecânicas e biológicas. A magnitude e duração da exposição determinam a extensão destas mudanças. A ASTM D 794 cobre a recomendação para o procedimento de determinação de efeitos permanentes devido ao aquecimento dos materiais. A ruptura devido ao aquecimento é definida como: “mudanças na aparência, peso, dimensão e em outras propriedades que alterem o material em um grau que afete sua servibilidade”. Esta é uma definição de natureza qualitativa e recomenda-se que estes ensaios sejam realizados com a proposta de comparação entre geomembranas candidatas a serem usadas em situações críticas.

Considerando baixas temperaturas, o ensaio para avaliar o efeito do frio na geomembrana segue a mesma linha geral do ensaio de aquecimento da geomembrana, mas o comportamento do material é, certamente, o oposto. O frio não irá, de uma maneira geral, degradar a geomembrana em situações específicas, considerando as temperaturas normalmente encontradas. Além disto, os ensaios em várias geomembranas apresentando tipos diferentes de emendas, não têm mostrado efeitos desfavoráveis até quinhentos ciclos de resfriamento. O único efeito significativo provocado por baixas temperaturas têm sido problemas relacionados à construtibilidade uma vez que a flexibilidade do material decresce dificultando a realização das emendas.

2.8.4 Exposição à luz

A luz do sol é uma importante causa da degradação de todo material orgânico, incluindo os polímeros dos quais as geomembranas são feitas. A propósito de geossintéticos a energia do sol é dividida em três partes:

- Infra-vermelho: comprimento de ondas maiores que 760 nm;
- Visível: comprimento de onda entre 400 e 760 nm;
- Ultravioleta (UV): comprimentos de onda menores que 400 nm.

Devido a esta sensibilidade dos materiais plásticos quanto à exposição à luz, especialmente à exposição UV, adiciona-se negro de fumo na resina básica durante o processo de fabricação das geomembranas. Esta sensibilidade pode ser determinada de acordo as normas ASTM G 23, G 26 e G53 (RIGO & CAFFUZZI, 1991).

De acordo com KOERNER (1990), as normas ASTM D 1435 e D 4364 são mais utilizadas quando se considera a estimativa da vida útil da geomembrana. Segundos estas normas a degradação das amostras é feita através de exposição excessiva ao tempo podendo, algumas vezes, intensificar a radiação pela rotação de espelhos que intensificam a energia solar. Estes ensaios são feitos em campo e laboratório.

2.8.5 Resistência biológica

As geomembranas podem ser atacadas por vários organismos, principalmente quando aplicadas em obras de contenção de resíduos. O termo geral usado para descrever a habilidade da geomembrana em resistir a este tipo de ataque é resistência biológica.

A resistência biológica das geomembranas pode ser examinada separando o efeito microbiológico devido a animais e plantas, do efeito microbiológico causado por fungos e bactérias.

Quanto à resistência da geomembrana em relação ao ataque de animais (como ratos) não existe nenhum procedimento de ensaio estabelecido e a determinação da espessura, dureza e resistência da geomembrana é apenas intuitiva.

Quanto à resistência ao ataque de plantas, algumas geomembranas podem ser perfuradas por raízes, como a planta "*Lupinus Albus*" que é bastante conhecida pela agressividade de suas raízes. Foi colocada uma amostra de geomembrana entre duas mudas da planta "*Lupinus Albus*" e após seis meses (após a planta ter germinado e crescido) constatou-se que nenhuma raiz tinha atravessado a geomembrana.

No que diz respeito ao ataque microbiológico, as geomembranas estão sujeitas à ação de fungos e bactérias. Usualmente os polímeros que constituem as geomembranas são bastante resistentes a fungos e bactérias. Geralmente são os plastificantes, lubrificantes, estabilizantes e colorantes os responsáveis por este ataque. É importante estabelecer a resistência da geomembrana quanto ao ataque microbiológico quando as geomembranas são aplicadas em condições de alta temperatura e umidade, pois favorecem o ataque microbiológico.

O procedimento para o ensaio ao ataque de bactérias em materiais plásticos está descrito na ASTM G 22-80 (parte A) e o procedimento quanto ao ataque de fungos na ASTM G 21-80, onde a amostra é então submetida ao ataque bacteriano por um período mínimo de 21 dias a uma temperatura de $36 \pm 1^\circ\text{C}$ e a uma umidade de no mínimo 80% (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

De acordo com PEGGS (1992), o plastificante do PVC (geralmente é o DOP_di-octil-ftalato ou DIDP_di-iso-decil-ftalato) é considerado um alimento desejado pelos roedores. Entretanto, resultados apresentados em uma pesquisa dos usuários de geomembranas de PVC indicaram um ou dois casos positivos em que roedores atacaram o PVC no campo, não deixando evidências de ter sido para alimentar, mas sim tão somente para obter aconchego através da geomembrana. Acredita-se que o HDPE não seja comido pelos roedores, apesar de algumas notificações de agressão das geomembranas de PE por algumas espécies de roedores.

2.8.6 Envelhecimento por SO₂ (para geomembrana de PVC)

Geomembranas de PVC podem ser atacadas pela presença de SO₂ na atmosfera.

O ensaio usualmente realizado para esta avaliação é descrito pela DIN 500017. A amostra é exposta na atmosfera, a uma temperatura de aproximadamente 40 °C e umidade relativa de 100%, na qual o teor de SO₂ é fixado. Amostras utilizadas no ensaio de tração são expostas sob estas condições e a resistência à tração é checada posteriormente (RIGO & CAZZUFFI, 1991).

2.8.7 Envelhecimento por ozônio (para geomembranas elastoméricas)

Geomembranas elastoméricas, se contiverem ligações duplas (do tipo -CH-CH-) são atacadas pelo ozônio presente na atmosfera.

A ASTM D 1149 descreve o procedimento do ensaio, onde as amostras de geomembranas, sob condições de deformação específica evidente, são expostas, para diferentes intervalos de tempo, em uma atmosfera contendo uma quantidade fixada de ozônio. O comportamento da geomembrana é satisfatório se nenhum “*crack*” (fissura) aparecer na sua superfície. A ISO R 1431-72 também é recomendada (RIGO & CAZZUFFI, 1994).

2.7.8 “*Stress-cracking*” (para geomembranas de HDPE)

Segundo KOERNER, (1997), a “*stress-cracking*” pode ser definida como fissuramento externo ou internamente nas geomembranas semicristalinas causado pela aplicação de tensões de tração menores que sua resistência mecânica a curto prazo.

Em condições simultâneas de aplicação de tensão e exposição a substâncias químicas (como sabão, solos, detergentes ou outros agentes agressores) alguns plásticos como o polietileno, podem romper mecanicamente por fissuramento.

A norma recomendada para realização do ensaio é a ASTM D 1693, comumente usada para medir a susceptibilidade da amostra ao fissuramento. Dez tiras apresentando marcas e dobras normalizadas são imersas em uma solução de detergente. Anota-se o tempo necessário para que cinco das dez amostras sejam quebradas. Este método apresenta algumas limitações quanto a uma avaliação da resistência ao fissuramento a longo prazo e não é recomendado para ensaiar emendas.

Outro método usado para medir a tendência ao fissuramento em geomembranas semi-cristalinas quando expostas simultaneamente a tensões e soluções de detergentes é a ASTM D 2552. Neste ensaio vinte amostras em forma de halteres (*dumbbell*) são submetidas a carga constante e determina-se o tempo necessário para a quebra de dez das vinte amostras. Este método tem sido utilizado para ensaiar emendas e maiores detalhes podem ser obtidos em KOERNER et al., (1990).

Segundo Koerner (1997), o ensaio de *stress-cracking (sob carga constante)*, está sendo desenvolvido pela ASTM, definido como corte sob tensão *constante (notched constant tension load – NCTL)*, designado por D 5397. Uma amostra na forma de haltere com um corte central e imersa em uma solução à temperatura de 50 °C é submetida a uma tensão constante, correspondente a uma porcentagem de sua resistência de escoamento. Fazem-se vários ensaios, utilizando diferentes porcentagens de resistência ao escoamento, obtendo o gráfico tempo de ruptura *versus* porcentagem de tensão na ruptura (*yield stress*).

Como a obtenção da curva do ensaio NCTL descrito anteriormente, requer a utilização de muitos corpos de provas e é relativamente longo, no apêndice da norma ASTM D 5397, apresenta a descrição do método que utiliza um único ponto (*single-point version: SP-NCTL*) o qual é utilizado para controle de qualidade. Na realização deste ensaio utiliza-se o mesmo procedimento do ensaio NCTL, porém impõe-se a utilização de 30% da tensão de escoamento. Se a amostra não apresentar ruptura com 200 horas, significa que o tempo de transição para a curva completa é pelo menos 100 horas.

2.8.9 Resistência química

A resistência química das diferentes geomembranas é, de uma maneira geral, conhecida. O problema aparece quando a substância química não é constituída de um único

componente. Nestes casos surgirão possíveis efeitos sinérgicos ((RIGO & CAFFUZZI, 1991).

De acordo com KOERNER (1997), a resistência química das geomembranas frente à substância em contato é um dos aspectos mais importante quanto a considerações de projeto. Por exemplo, em sistemas de contenção de resíduos sólidos e resíduos perigosos, o agente poluidor pode estar diretamente em contato com a geomembrana. Então a resistência das geomembranas precisa ser garantida para assegurar a durabilidade das instalações.

Esta situação tem sido, há muito tempo analisada, e fabricantes e produtores têm publicado inúmeras tabelas que apresentam valores de resistência química para vários tipos de geomembranas, como apresentado na Tabela 2.19.

TABELA 2.19. Guia geral da resistência química para algumas geomembranas mais comuns, (KOERNER, 1997).

SUBSTÂNCIA QUÍMICA	TIPO DE GEOMEMBRANA							
	Butyl		PE		PVC		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				
Alcoois	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. Contudo estas tabelas são geralmente de confiança. Existem muitas situações onde ensaios de resistência química necessários:

- Quando a substância química não é constituída por um único componente e possíveis efeitos sinérgicos são desconhecidos;
- Quando a composição da substância química resultante não é conhecida, como ocorre na avaliação do percolado gerado em um aterro sanitário antes de sua construção.
- Quando a geomembrana não é constituída de um único material e sim de uma combinação de materiais;
- Quando as geomembranas são modificadas nas emendas ou quando emendadas com materiais diferentes do material base constituente da geomembrana;
- Quando em sistemas de contenção de resíduos, a integridade da geomembrana é solicitada por um longo período de tempo, durante o qual as características do percolado podem ser alteradas;
- Em circunstâncias não testadas, como em locais em particular, onde a geomembrana vai estar submetida a condições extremas de frio e calor;
- Quando listas ou tabelas não apresentam novas formulações de geomembranas, como por exemplo, a tabela 24 que não menciona VLDPE, LLDPE, LDLPE, PP e PP-R.

Os ensaios de resistência química em geomembranas, para as condições específicas mencionadas acima requerem quatro importantes decisões a serem tomadas: a seleção do líquido a ser usado, a precisão da célula de incubação (temperatura, atmosfera, orientação e remoção), o tipo da amostra ensaiada e a avaliação dos resultados dos ensaios.

Existe uma grande variação no percolado formado em cada aterro sanitário, não sendo possível utilizar um percolado típico. Dessa forma a seleção do líquido é em função do local em que a geomembrana será instalada. Para aterros sanitários de resíduos perigosos, deve-se utilizar nos ensaios de incubação um líquido com alta concentração de substâncias químicas (isto é, vários solventes orgânicos).

A célula de incubação pode, algumas vezes, ser feita em recipiente aberto ou em tubo, mas geralmente é usado um recipiente fechado do tipo mostrado na Figura 2.32. As geomembranas ensaiadas são removidas após 30, 60, 90, e 120 dias de acordo com as ASTM D 5322 e D 5496 quando são cortadas e amostras para ensaios de avaliação.

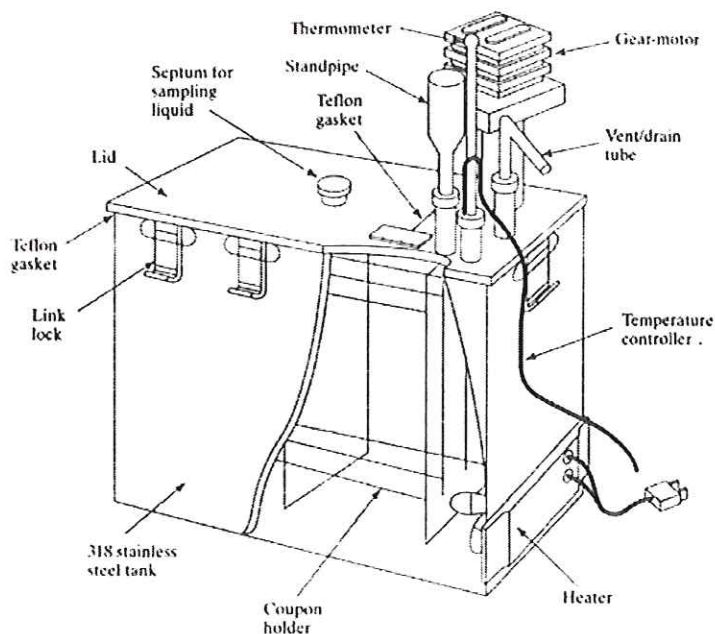


Figura 2.32. Esquema do compartimento de incubação para análise do comportamento de resistência química das geomembranas (KOERNER, 1997).

Segundo SHARMA & LEWIS (1994), a resistência química das geomembranas normalmente é determinada pelo método de ensaio USEPA 9090, sendo requisito obrigatório nos EUA para revestimentos de resíduos perigosos. TINGER (1991), aponta, no entanto deficiências neste método:

- Inexistência de critério efetivo para definir as alterações aceitáveis nas propriedades dos materiais durante o ensaio;
- As alterações nas propriedades dos materiais registradas pelo ensaio não são correlacionáveis com as condições de campo e com o desempenho a longo prazo a que estão submetidos os mesmos materiais;
- O ensaio é relativamente curto perante a vida útil da maioria das geomembranas;
- O ensaio não simula as alterações na composição dos efluentes líquidos e do percolado;
- As amostras não são submetidas a qualquer tensão durante o ensaio.

De acordo com KOERNER (1997), a avaliação da degradação das geomembranas pode ser feita através de ensaios físicos (espessura, perda de massa, largura, dimensões e dureza), mecânicos (tração, rasgo, punção e impacto) e de permeabilidade (líquido, vapor, etc).

A Figura 2.33 apresenta as curvas obtidas para o HDPE em contato com chorume de resíduo sólido urbano a 50 °C em comparação ao material virgem em função do tempo. As

curvas obtidas são o que geralmente se encontra neste tipo de análise, pode-se observar que as mudanças nas propriedades físicas das geomembranas são menos significantes que as mudanças nas propriedades mecânicas. Nenhuma tendência consistente é estabelecida, tampouco um aumento ou diminuição uniforme. Os resultados encontrados num ensaio similar, porém à temperatura de 23 °C foram semelhantes. Pode-se constatar que, caso a geomembrana reagisse com o chorume, ocorreria um procedimento uniforme nas mudanças sofridas e as mudanças a altas temperaturas, deveriam ser maiores que as ocorridas a baixas temperaturas. Como não se distingue nenhuma tendência que indique uma reação, e por consequência a degradação da geomembrana, pode-se concluir que os resultados apresentam uma certa dispersão inerente a variação dos materiais e aos ensaios em si. Além disso, a propriedade que apresenta maior variação é módulo de elasticidade, como pode ser observado na Figura 2.33 (b) e é também o que apresenta maior possibilidade de erro na sua obtenção, quando comparado às demais propriedades analisadas.

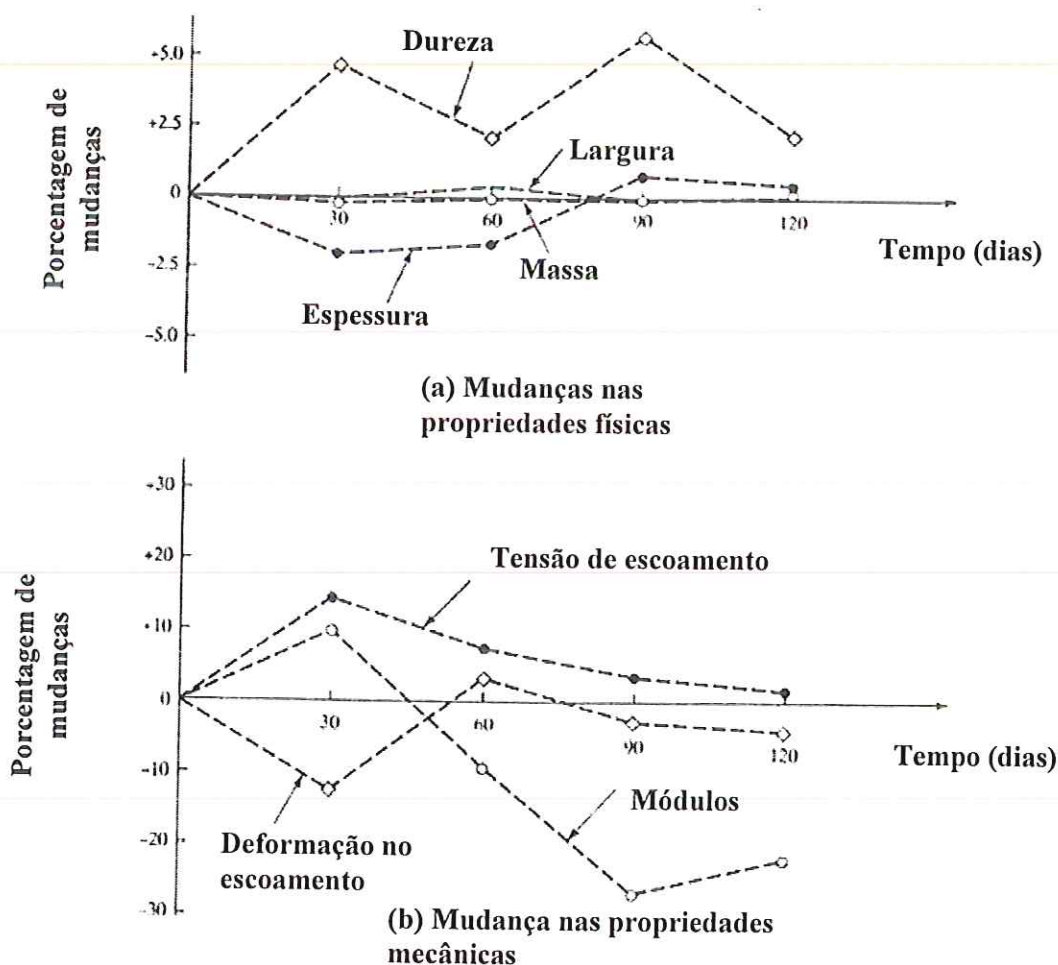


Figura 2.33. Comportamento de amostras de HDPE imergidas em percolados de aterro sanitário a 50°C por 120 dias (KOERNER, 1997).

Embora não existam regras estabelecidas na porcentagem de variação permissível quanto às propriedades comparadas ao ensaio original (veja Tabela 2.20 para valores sugeridos) fica claro que o polietileno é mais resistente à maioria dos solventes orgânicos e às substâncias químicas e que, o aumento de densidade aumenta a resistência química das geomembranas. Então geomembranas de HDPE são amplamente usadas em sistemas de contenção de aterros sanitários.

TABELA 2.20. Sugestão para valores limites de diferentes ensaios em geomembranas incubadas, (KOERNER, 1997).

Polímeros termoplásticos e termofixos (exemplo: PVC, CSPE-R, EPDM-R)							
Propriedades		R		NR			
Taxa de permeabilidade	(g/m ² /hr)	<0.9		>0.9			
Varição de peso	(%)	<10		>10			
Varição de volume	(%)	<10		>10			
Varição na resistência à tração	(%)	<20		>20			
Varição no alongamento na ruptura	(%)	<30		>30			
Varição nos módulos	(%)	<30		>30			
Varições na resistência à dureza (pontos)	(%)	<10		>10			
Polímeros semi-cristalinos (HDPE)							
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
Varição de peso	(%)	<05	>1.0	<3	≥3	<2	≥2
Varição de volume	(%)	<0.2	>0.5	<1	≥1	<1	≥1
Varição na à tração de escoamento	(%)	<10	>20	<20	≥20	<20	≥20
Varição no alongamento no escoamento	(%)	-	-	<20	≥20	<30	≥30
Varição nos módulos	(%)	-	-	-	-	<30	≥30
Varição na resistência ao rasgo	(%)	-	-	-	-	<20	≥20
Varição na resistência ao puncionamento	(%)	-	-			<30	≥30

R = resistente; NR = não resistente.

Segundo VAN ZANTEN (1986), o polietileno de alta densidade apresenta alta resistência química quando em contato com álcool, éter e acetona. O polietileno, por ser não-

polar, apresenta uma tendência de baixa resistência a materiais também não-polares, como o benzeno e tolueno, porém, seu alto grau de cristalinidade dificulta a penetração dessas substâncias aumentando sua resistência.

Já o PVC apresenta resistência moderada quanto aos ataques químicos de sais e bases por serem constituídos por longas cadeias lineares e a substâncias fracamente polares como a acetona. Apresenta resistência alta a substâncias altamente polares como a água.

2.8.10 Oxidação

Segundo Koerner (1997), quando um radical livre é formado, (isto é, em um átomo de carbono na cadeia polimérica) o oxigênio pode causar algum tipo de degradação ao longo do tempo. Um oxigênio combinado a um radical livre forma um radical hidroperóx, que se engaja na estrutura molecular. Se ocorrer eventual reação com outra cadeia polimérica, cria então um novo radical livre o que causa a quebra da cadeia polimérica. Aditivos antioxidação (antioxidantes) são adicionados na composição das membranas, para eliminar ou minimizar este processo. Estes aditivos ou estabilizantes são específicos para cada tipo de resina, e se a geomembrana não estiver em contato com o oxigênio, obviamente este processo não ocorrerá. Então para geomembranas que se encontram cobertas com resíduo ou com líquidos, este processo é consideravelmente retardado. Ao contrário, geomembranas expostas ao oxigênio, ou em contato com solo parcialmente saturado estará mais susceptível ao fenômeno.

Deve-se considerar que a oxidação dos polímeros irá, eventualmente, causar a degradação do material, mesmo que não ocorra outro tipo de degradação.

Existem duas normas para se determinar a quantidade e/ou o esgotamento de antioxidante, determinadas de ensaio de tempo de indução de oxidação (*oxidative induction time test -oit*): *Standart OIT* (ASTM D 3895): este ensaio utiliza o equipamento do ensaio DSC, mencionado anteriormente. Nele, 5 mg de amostra são aquecidos sob temperatura de 200 °C a uma taxa de 20 °C /mm, sob uma atmosfera nitrogenada. Introduce-se então o oxigênio e o ensaio termina quando se forma um pico isothermal, e o OIT é determinado. O tempo de indução está relacionado à quantidade e ao tipo de antioxidante utilizado. Este método é utilizado para alguns tipos de antioxidantes em particular.

High Pressure OIT (ASTM D 5885): a oxidação é conduzida sob pressão de 3500 kPa e à temperatura de 15°C. Obtem-se uma resposta similar ao descrito anteriormente, porém este teste é considerado mais representativo e é utilizado para todo tipo de antioxidante.

De acordo com a THOMAS (1996), O tempo de indução de oxidação (OIT) mínimo para geomembranas de HDPE nos EUA é 100 mim. Às normas alemã requerem que este valor esteja entre 30 e 40 minutos (HUTTEN, 1996)

2.9. Resultados de Estudos Realizados em Geomembranas

PEGGS (1992), argumentou que embora o HDPE possa ser tecnicamente mais resistente que o PVC para a lixívia de resíduos municipais, o PVC também oferece resistência adequada para conter esse percolado. De acordo com resultados de ensaios realizados por três laboratórios diferentes em geomembranas de PVC em contato com lixívia de resíduo perigoso e de resíduos municipais, utilizando o método 9090 do “ETA”, nenhuma das geomembranas de PVC apresentou resultado insatisfatório nos testes. Um dos ensaios em lixívia perigosa foi realizado à temperatura de 85 °C e embora tenha havido alguma perda de plastificante, a geomembrana de PVC foi bem sucedida nos testes. Isto confirma que é extremamente importante reconhecer que, embora alguma mudança de propriedade tenha ocorrido, o material pode ainda fornecer serviço adequado. Existe um grande número de evidências, não somente de acordo com resultados de método de ensaio da EPA “9090”, mas também nas experiências de campo que o PVC é capaz de conter as lixívias de resíduos sólidos urbanos.

Em outro trabalho realizado por PEGGS (1992), os resultados obtidos em ensaios realizados em geomembranas de PVC, com espessura de 0,75 mm, instaladas em taludes de canais de irrigação por 27 anos, demonstraram que, embora tenham perdido alguma porcentagem de plastificantes, as geomembranas mantiveram ainda o suficiente para conservar a mabeabilidade e flexibilidade sem comprometer sua servicibilidade. Em geomembranas de PVC, no início, o plastificante das camadas de superfície se perde rapidamente; 30% dos plastificantes podem ser perdidos nos primeiros 4 anos de utilização. Como o plastificante difunde-se do interior da geomembrana para a superfície, a taxa de perda de plastificante *versus* tempo deve ir diminuindo, resultando em menos de 50% de perdas após 19 anos. Mesmo que 75% dos plastificantes sejam perdidos em uma geomembrana de PVC, o que vem a causar aumento da resistência ao rasgo e ao puncionamento e diminuição da mabeabilidade e alongamento na ruptura, a geomembrana ainda poderá deformar 100% de seu comprimento. Este valor é 10 vezes maior do que a deformação no escoamento (*yield strain*) atribuída ao polietileno.

GIROUD & TISINGER (1995) desenvolveram uma expressão matemática que relaciona a perda de plastificantes e o aumento de densidade em geomembranas de PVC. As geomembranas de PVC são compostas pela resina base, e outros aditivos além dos

plastificantes. Uma redução no teor de plastificante tem como consequência um certo encolhimento e aumento de densidade da geomembrana de PVC. Isto ocorre porque a densidade dos plastificantes é menor que a dos demais constituintes das geomembranas. Então, um aumento de densidade em geomembranas de PVC é uma indicação da perda de plastificantes.

Segundo STAFF (1991), plastificantes são materiais orgânicos adicionados nas formulações de PVC para obter um material mais flexível. Os plastificantes são muito compatíveis com a resina de PVC e tornam-se uma parte permanente do produto final. A taxa de perda de plastificante depende do tipo de plastificante utilizado, da temperatura a que a geomembrana está submetida, da espessura e do tempo. O mecanismo de perda consta da evaporação do plastificante da superfície da membrana. A perda de plastificantes pode ser identificada através de:

- Redução de peso da amostra;
- Uma pequena redução na espessura;
- Aumento da resistência à tração;
- Redução da deformação na ruptura.

Ensaio de envelhecimento acelerado, de acordo com a norma ASTM D 1203 permitem comparar a porcentagem de perda de peso da amostra com a porcentagem de perda de plastificante sob variação de temperatura. Geralmente uma redução de peso da ordem de 10 % significa uma perda entre 25-33 % de plastificante.

“*Bureau of Reclamation*” removeu amostras de PVC de 0,25 mm de espessura de quatro locais diferentes em um canal de irrigação, após 2, 4, 5, 9, 14 e 19 anos após instalação e comparou as variações encontradas nas propriedades físicas e mecânicas com uma amostra de controle (material virgem). Os resultados encontrados nos parâmetros obtidos nos ensaios de tração e rasgo são os constantes da Tabela 2.21.

Após 19 anos a amostra ainda atendia as especificações de projeto apresentando deformação na ruptura superior a 100 %.

De acordo com resultados apresentados por FRANK (1991), uma amostra de geomembrana retirada do aterro sanitário de Condado de Lycoming, Pennsylvanis - EUA, após exposição ao percolado por 11 anos, ainda estava bem flexível sem apresentar sinais visíveis de degradação. Os poucos problemas que têm ocorrido com a geomembrana de PVC estão, como na maioria das falhas a que o polietileno está sujeito, relacionados à confecção inadequada, falhas de instalação e/ou a um pobre controle de qualidade CQA – (*Construction Quality Assurance*).

TABELA 2.21. Resultados encontrados nos ensaios de tração e rasgo, realizados em amostras de PVC amostras após 2, 4, 5, 9, 14 e 19 anos após instalação, (STAFF, 1991).

Anos de serviço	Perda de plastificante %	Resist. à tração lb/in	Deformação %	Resist. ao rasgo N
2	7,9	30,7 (L)	167 (L)	202 (L)
		28,8 (T)	233 (L)	392 (T)
4	32,3	29,3 (L)	123 (L)	119 (L)
		31,8 (T)	176 (T)	99 (T)
5	32,2	29,6 (L)	153 (L)	144 (L)
		28,7 (T)	208 (T)	176 (T)
9	34,4	34,6 (L)	180 (L)	183 (L)
		28,7 (T)	225 (T)	349 (T)
14	42,0	26,0 (L)	169 (L)	166 (L)
		33,3 (T)	225 (T)	221 (T)
19	45,7	28,6 (L)	151 (L)	450 (L)
		26,9(T)	188 (T)	130 (T)
Material original	0	17	225	150

LOPES e MONTEIRO (1999), realizaram um trabalho que avaliou a variação no comportamento à tração de geomembranas de HDPE de 1,0, 1,5 e 2,0 mm de espessuras submetidas por períodos de 5, 15 e 30 semanas à ação de: agentes atmosféricos, temperaturas elevadas, lixiviado de um aterro de resíduos sólidos urbanos, soluções ácidas, alcalinas e de cloreto de sódio. Os resultados encontrados foram comparados às das amostras virgens tomados como 100 %. Os resultados encontrados demonstraram que:

- De modo geral pode-se observar que os agentes de degradação analisados afetaram mais a geomembrana menos espessa;
- No final do período de exposição, as amostras submetidas ao efeito da atmosfera apresentaram um comportamento mais frágil;
- O comportamento tensão deformação de todas as geomembranas ensaiadas foi significativamente afetado pelo aumento de temperatura e as maiores variações ocorreram na amostra de 1,0 mm tornando seu comportamento mais dúctil,
- As amostras expostas ao lixiviado apresentaram redução de resistência à tração com valores mais significativos para a amostra menos espessa, porém com o aumento do

tempo de exposição pode-se observar um comportamento mais frágil, sendo o aumento de rigidez crescente com aumento da espessura;

- O contato com a solução ácida provocou maior degradação que o encontrado nas amostras em contato com o lixiviado, em especial para os períodos inferiores à 15 semanas; já o efeito da exposição à solução alcalina causou variações intermediárias às encontradas nas amostras em contato com soluções ácidas e com a lixívia.

KOERNER & EITH (1998), realizaram um estudo em uma amostra de HDPE de 1,5 mm de espessura retirada de um sistema de impermeabilização composto de um aterro sanitário de resíduo sólidos urbanos após 8 anos de utilização. O sistema de impermeabilização consta de duas geomembranas de HDPE protegidas por camadas de solo argiloso. Pôde-se constatar que a geomembrana primária esteve em contato com o percolado, porém a com função secundária não chegou a ser solicitada. Na época da construção do aterro foram realizados ensaios físicos e mecânicos que permitiram fazer uma comparação com os mesmos parâmetros encontrados na amostra retirada após 8 anos. Os resultados encontrados permitiram concluir que:

- Todos os parâmetros analisados apresentaram valores superiores às especificações mínimas de projeto;
- Não houve variações significativas entre os ensaios realizados na amostra em contato com o percolado com a que não este em com o percolado;
- Pôde-se observar um ligeiro decréscimo no valor de OIT entre as amostras expostas e a amostra original;
- As variações encontradas entre a amostra original e as amostras ensaiadas após 8 anos foram pouco significativas, sendo atribuídas aos próprios coeficientes de variação dos ensaios.

Como considerações finais, serão apresentadas algumas questões levantadas no Primeiro Workshop de Geomembranas EUA-Alemanha, realizado em Berlim em junho de 1996, quanto à utilização e a vida útil das geomembranas.

Nos EUA, o ensaio de resistência química original refere-se ao método 9090 da EPA no qual amostras de geomembranas são imersas em um coquetel químico e removidas periodicamente para avaliar as mudanças ocorridas em algumas de suas propriedades, de acordo com o mencionado anteriormente. Este ensaio está sendo atualizado através da confecção de duas novas normas ASTM, que procuram estimar a durabilidade química, tanto de geomembranas como de todos os geossintéticos usados em obras de contenção de resíduos as quais estão divididos em (KOERNER, 1996):

- Protocolo D 5322: que trata da incubação em laboratório;
- Protocolo D 5496 que se refere à incubação em campo.

Não existem especificações federais detalhadas quanto à caracterização de cada componente utilizado em sistemas de impermeabilização de resíduos, de maneira diferente, das especificações já existentes quanto à espessura mínima exigida. O Instituto de Pesquisa em Geossintéticos (GRI) está trabalhando em uma norma neste sentido e a Tabela 2.22 apresenta as especificações quanto à utilização de geomembranas de HDPE.

TABELA 2.22. Projeto de norma ASTM para geomembrana de HDPE utilizada em sistemas de contenção de aterro sanitários, segundo o GRI, (KOERNER, 1996).

Propriedades	Norma utilizada	Resultado do ensaio	Frequência mínima do ensaio
Espessura (média mínima)	D 5199	Nominal (mils)	Por 15000 lb
Espessura (menor valor individual)	D 5199	- 10 %	Por 15000 lb
Densidade mínima	D 1505	0,940 g/cm ³	Por 200000 lb
Ensaio de tração (valores mínimos)	D 638 Tipo IV		Por 15000 lb
Tensão no escoamento	D 638 Tipo IV	2100 psi	
Tensão última	D 638 Tipo IV	3800 psi	
Deformação no escoamento	D 638 Tipo IV	12 %	
Deformação última	D 638 Tipo IV		700 %
Resistência ao rasgo (mínima)	D 1004	70 lb	Por 45000 lb
Resistência ao puncionamento	D 4833	180 lb	Por 45000 lb
Resistência ao "stress crack"	D 5397	200 h	Por GRI GM 10
Teor de negro de fumo	D 1603	2,0-3,0 %	Por 15000 lb
Dispersão de negro de fumo	D 5596		Por 45000 lb
Valor de OIT mínimo	D 3895	100 min	Por 200000 lb
Valor de OIT mínimo (alta pressão)	D 5885	400 min	Por 200000 lb
% de OIT retida após 90 dias a 85 °C	D 3895	60 %	Por formulação
ensaio realizado sob alta pressão	D 5885	400 min	Por 200000 lb
Resistência UV	GM 11		

Quanto à vida útil de um sistema de impermeabilização, existe uma diferença de "filosofia de projeto" entre os Estados Unidos e a Alemanha, (KOERNER & ENGLEMANN, 1996).

Nos EUA, quanto à vida útil da obra não existe distinção entre sistemas simples ou compostos. As regulamentações federais requerem que o tempo mínimo seja de 30 anos após o encerramento das operações no aterro. No entanto cada autorização requer uma audiência pública e a maioria dos cidadãos tem apresentado tendência em aumentar este tempo. Alguns estados especificam tempo mínimo de 100 anos. O departamento de energia, inicialmente desejava sistemas com servicibilidade de 10000 anos para resíduos radiativos, porém tem-se procurado alcançar 1000 anos. Os dois períodos podem ser considerados bem longos. Até o momento não existe nenhuma especificação federal quanto à disposição de resíduos radioativos.

Na Alemanha considera-se que uma obra de contenção de resíduos deve ser uma obra permanente. Com este fim exige-se a utilização sistemas compostos. Quanto ao tipo de material utilizado na fabricação das geomembranas, exige-se que se utilize o melhor material possível, que apresente a maior resistência química quanto às substâncias presente no percolado. Neste caso, se ocorrer algum tipo de vazamento através da geomembrana, a camada mineral deve prevenir que ocorra um vazamento intenso do percolado, considerando que, caso ocorra a ruptura da geomembrana, (abertura de um buraco, por exemplo), isto deve representar apenas um efeito limitado no sistema de impermeabilização composto. Na Alemanha, entende-se que a detecção de um vazamento só pode ser útil durante o período de construção.

Nos Estados Unidos, caso se detecte um vazamento em uma célula do aterro o resíduo é retirado e faz-se então o reparo necessário. Considerando que, na maioria das vezes, os vazamentos ocorrem logo após a construção os reparos não são muitos dispendiosos.

Nos EUA, tem-se monitorado entre 30-40 aterros desde 1990 e medido a taxa de vazamento através da camada primária do sistema de impermeabilização. Em alguns a taxa de vazamento foi zero. Em outros encontrou algum tipo de vazamento. A filosofia dos americanos é a de não procurar construir um sistema de impermeabilização que nunca vaze, admite-se que uma quantidade nominal de vazamento ocorra. Por exemplo, emendas que aparentam estar boas durante a construção podem apresentar problemas com o tempo, e fissuras podem desenvolver. O sistema de detecção age como uma válvula de segurança que permite monitorar e entender o que está acontecendo no sistema.

Sistemas compostos são usados nos Estados Unidos quando camadas de argila não são disponíveis. Existe possivelmente uma equivalência entre os sistemas duplos americanos e os sistemas compostos da Alemanha.

Na Alemanha apenas geomembranas licenciadas podem ser utilizadas, A aceitação da geomembrana é feita pelo MBC-*Multi-Barrier-Concept* e não existe um órgão similar nos Estados Unidos.

Outra diferença entre os Estados e a Alemanha está na realização dos ensaios químicos. Nos Estados unidos utiliza-se um chorume sintético. O percolado é testado quanto a mais de 800 tipos de substâncias químicas diferentes. Se a concentração encontrada for superior ao nível permitido, o aterro é classificado como perigoso. O governo federal determina o nível máximo de concentração de substâncias químicas e tem se observado que as vezes esta classificação é bastante arbitrária e um tanto suspeita. Na Alemanha tem-se uma certa resistência quanto à utilização de chorume sintético. Pois, como o chorume sintético é formulado em função das características do percolado do local específico onde a geomembrana será instalada, tem-se a possibilidade de outra geomembrana diferente do HDPE vir a ser selecionada.

Diferentes polímeros são utilizados na fabricação das geomembranas, e isto irá afetar sua vida útil. Não se pode afirmar categoricamente a vida útil das geomembranas, Os Estados Unidos utilizam o ensaio de OIT para tentar estabelecer o comportamento de oxidação da geomembrana para um estabilizante específico. Pesquisas realizadas pelo MBC têm comparado os valores de OIT com as propriedades mecânicas das geomembranas e os resultados têm demonstrando que o monitoramento apenas das variações de OIT com o tempo não indica uma deterioração das propriedades mecânicas. Pesquisas similares estão sendo realizadas nos EUA, correlacionando exposição a raios ultravioletas, variação de OIT e propriedades mecânicas. Os resultados têm demonstrado que uma relação entre a diminuição no valor de OIT e a vida útil da geomembrana é pouco provável.

Apesar disso, nos EUA considera-se que a variação no valor de OIT corresponde ao primeiro estágio de degradação das geomembranas. De acordo com as normas ASTM, deve-se monitorar a diminuição no teor de antioxidante comparando os resultados ao material original e definir uma porcentagem máxima de redução após 90 dias de incubação à temperatura de 85 °C. Os resultados são avaliados usando o ensaio de OIT e OIT a alta pressão, e têm demonstrado que o tempo de esgotamento do antioxidante está entre 40-120 anos. Muitos entre os especialistas em materiais poliméricos não estão de acordo com esta previsão, mas para os engenheiros e órgão reguladores estes dados são muito poderosos, porque, com isso, pode-se estimar que, por aproximadamente 100 anos, não ocorrerá degradação nas propriedades mecânicas das geomembranas.

O tempo entre o esgotamento do antioxidante e o início da degradação nas propriedades mecânicas das geomembranas é conhecido como “tempo de indução- *induction*”

time". Esta degradação ocorre em uma função da temperatura a que a geomembrana está submetida.

Adicionando a estimativa de vida útil obtida através dos ensaios de OIT e o tempo de indução pode-se prever que a vida útil das geomembranas esteja entre 200 e 1000 anos. Por esta razão os EUA têm adotado o valor de OIT mínimo juntamente ao ensaio de redução máxima após incubação por 90 dias à temperatura de 85 C para assegurar uma vida útil satisfatória. Todas as geomembranas comercializadas nos Estados Unidos são submetidas a estes dois ensaios. Acredita-se que esta prática é mais satisfatória que as críticas feitas aos ensaios de OIT.

Como uma síntese sobre a aplicação de geomembranas, tem-se, de acordo com PEGS & THIEL (1998), que nos últimos anos o polietileno de alta densidade (HDPE) tem sido considerado praticamente como sinônimo da palavra "geomembrana". Porém, a existência de diferentes tipos de resinas que constituem as geomembranas disponíveis, (PE, PVC, PP, CSPE, PET), com muitas propriedades úteis, faz com que a escolha da geomembrana apropriada seja feita com base nas propriedades das resinas e na aplicação em questão.

Por exemplo, enquanto uma geomembrana com função primária em sistema de impermeabilização da fundação de aterros sanitários pode estar em contato direto com o percolado, a geomembrana utilizada no sistema de impermeabilização de cobertura pode estar susceptível à agressão devido à radiação ultravioleta e variação de temperatura. Então, as condições de servicibilidade das geomembranas podem ser bastante diferentes, sendo inapropriado assumir que apenas um material é adequado.

O primeiro passo na seleção do material apropriado é a identificação de todos os fatores que influenciam no comportamento da geomembrana quanto a uma aplicação específica. Deve-se levar em consideração as diferenças entre funções primárias e secundárias em sistemas de impermeabilização da base e cobertura de aterros sanitários. Não devem ser feitas análises apenas quanto ao comportamento mecânico, físico e químico do material, mas também quanto à instalação (temperatura e vento), intervalo de tempo entre instalação e condições de serviço designado, além de requerimentos operacionais de manutenção.

Os atributos positivos e negativos de cada material devem ser comparados com as necessidades básicas de cada projeto, para fazer a seleção dos materiais candidatos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Geomembranas

Utilizaram-se geomembranas de PVC, de 1,0 e 2,0 mm de espessura fornecidas pelo mesmo fabricante, divididas em dois lotes, identificados como Lote I e Lote II.

As amostras de HDPE, de 1,0 e 1,5 mm de espessura foram fornecidas por dois fabricantes diferentes, que foram identificadas como fabricantes “A” e “B”.

3.1.2 Amostras submetidas ao envelhecimento natural

As amostras de geomembranas submetidas ao envelhecimento natural constam de:

- Amostras de PVC e HDPE (fornecida pelo fabricante “A”) de 1,0 mm de espessura retiradas do sistema de impermeabilização de um Aterro Experimental localizado no Aterro Bandeirantes na cidade de São Paulo, após 18 meses da instalação;
- Amostra de PVC de 1,0 mm retirada do sistema de impermeabilização de um aterro sanitário de resíduos classe I, após 12 anos de utilização.
- Amostras colocadas na lagoa de tratamento de chorume do aterro sanitário de São Carlos e retiradas após 5 e 8 meses de imersão. As amostras de PVC referem-se ao Lote I e as de HDPE são as fornecidas pelo fabricante “A”.

Para a caracterização do percolado proveniente do aterro, foram realizados alguns ensaios no Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, de acordo com o apresentado na Tabela 3.1, segundo dados coletados por PINTO(2000).

TABELA 3.1. Caracterização dos líquidos percolados para a lagoa de chorume do aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

Parâmetro	Lagoa de chorume
DQO (mg/l)	7780
DBO (mg/l)	4588
N orgânico (mg NH_4^+ /l)	460
N amoniacal (mg NH_4^+ /l)	564
Fósforo (mg PO_4^{3-} /l)	18,9
Alcalinidade (mg CaCO_3 /l)	12046
Ácido acético (mg/l)	181
Ácido propiônico (mg/l)	1925
Ácido isobutírico (mg/l)	< 10
Ácido butírico (mg/l)	< 10
Ácido isovalérico (mg/l)	222
Ácido valérico (mg/l)	< 10
Ácido capríco (mg/l)	< 10
Sólidos Totais (mg/l)	10058
Sólidos Voláteis (mg/l)	5656
Sólidos Suspensos (mg/l)	1305
Sólidos Suspensos Voláteis (mg/l)	1023
Zn (mg/l)	2,44
Pb (mg/l)	0,09
Cd (mg/l)	ND
Ni (mg/l)	0,16
Fe (mg/l)	64,05
Mn (mg/l)	5,06
Cu (mg/l)	0,32
Cr (mg/l)	0,07

ND – Não Detectado.

3.1.3 Amostras envelhecidas em laboratório.

- Amostras expostas à temperatura de 75°C ($\pm 5^{\circ}$) em estufa, sem circulação de ar: amostras retangulares (30,0 x 50,0 cm) de PVC de 1,0 e 2,0 mm, referentes ao Lote I e amostras de HDPE, de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “A” foram colocadas em estufa, de acordo com esquema apresentado na Figura 3.1 durante os períodos de 1, 3 e 9 meses.



Figura 3.1. Amostras de PVC de 1,0 e 2,0 mm e de HDPE de 1,0 e 1,5 mm expostas à temperatura de 75°C em estufa sem circulação de ar.

- **Amostras submersas em óleo diesel e gasolina:** amostras retangulares (15,0 x 20,0 cm) de PVC de 1,0 e 2,0 mm, retiradas do Lote II, e de HDPE, de 1,0 e 1,5 mm fornecidas pelo fabricante “B”, foram presas em uma grade de madeira, de modo que as amostras não estivessem em contato umas com as outras, e imersas em galões contendo gasolina e óleo diesel separadamente, como pode ser observado na Figura 3.2.



Figura 3.2. Grade de madeira, para fixação das geomembranas imersas em gasolina e óleo diesel, de forma que as amostras não estivessem em contato umas com as outras.

3.2 Amostragem

3.2.1 Aterro Experimental Bandeirantes

As amostras submetidas a envelhecimento natural em aterro de resíduos sólidos urbanos foram retiradas de um aterro experimental construído no Aterro Bandeirantes (MARQUES, 2001), localizado na cidade de São Paulo, com o objetivo de estudar, entre outros aspectos, o comportamento do sistema de impermeabilização da fundação ao longo do tempo. Esta análise consta da avaliação da degradação natural das geomembranas, e uma possível contaminação do solo abaixo das geomembranas, amostrados na primeira campanha de investigações, realizada entre 16 e 18 de agosto de 1999, 18 meses após o encerramento do aterro experimental.

A fundação do Aterro Experimental é composta dos seguintes elementos:

- ◆ Camada de regularização de solo silto-argiloso compactado (material proveniente das escavações obrigatórias das áreas de implantação dos subaterros AS-4 e AS-5) com espessura variável entre 0,6 m e 1,5 m, executada visando uniformizar e regularizar a praça de trabalho para implantação do experimento;

- ◆ Geomembrana de HDPE de 1,0mm do fornecedor “A”;
- ◆ Geomembrana de PVC de 1,0 mm.

Para efeito de comparação, na época da construção do aterro, março de 1997, realizou-se a coleta de amostras de solo virgem nos locais correspondentes às futuras amostragem de geomembranas de PVC e HDPE, os quais correspondem à cava E1 (PVC) e à cava E2 (HDPE). Por problemas de estocagem junto ao Aterro Experimental, não foi possível recuperar as amostras virgens das geomembranas utilizadas no sistema de impermeabilização, na época da construção.

A coleta e retirada das amostras de solo e de geomembranas ocorreram de acordo com a descrição que se segue: foi executada a abertura da vala/trincheira em dois pontos previamente definidos, correspondentes às regiões com distintos tratamentos (geomembranas de PCV e de HDPE). Os trabalhos de escavação foram realizados com equipamento mecânico (escavadeira hidráulica 320-B) e manual para evitar qualquer tipo de dano aos materiais de fundação. As dimensões das valas/trincheiras foram suficientes para coleta dos materiais, para a reposição dos tratamentos e para a execução dos trabalhos com segurança necessária aos operários e técnicos. Os taludes foram definidos em projeto com inclinação de 1:1, mas apresentaram-se bem mais íngremes como pode ser observado na Figura 3.3.



Figura 3.3. Inclinação dos taludes das valas abertas para amostragem das geomembranas.

O perfil da camada de solo e resíduo acima da geomembrana de PVC consta de:

- Camada de solo (de aproximadamente 0,91 m);
- Camada de resíduo (de aproximadamente 0,5 m);
- Camada de solo (de aproximadamente 0,5 m);

- Camada de resíduo (de aproximadamente 0,5 m);
- Camada de solo (de aproximadamente 0,5 m).

Na amostragem da geomembrana de PVC a primeira camada de solo apresentou profundidade de aproximadamente 0,91m, quando se atingiu a primeira camada de lixo. Retirado o lixo, perfurou-se a próxima camada de solo, com aproximadamente 40,0 cm, interrompeu-se a escavação mecânica e iniciou-se uma sondagem manual (utilizando-se enxadas), para localização da geomembrana. Constatou-se que havia mais uma camada de lixo. Retornou-se à escavação mecânica até atingir a última camada de solo. Fez-se mais uma sondagem manual e constatou-se que a geomembrana de PVC encontrava-se a aproximadamente 50,0 cm abaixo da última camada de solo. Para a retirada dos últimos 5,0 cm de solo acima da geomembrana de PVC, utilizaram-se enxadas com proteção nas lâminas evitando que ocorresse qualquer dano à geomembrana. Encontrou-se, no total, um volume pequeno de lixo, bem seco, sem nenhuma presença de chorume e com muito solo, como pode ser visto na Figura 3.4.



Figura 3.4. Lixo retirado da Cava E₁, impermeabilizada com geomembrana de PVC.

O perfil da camada de solo e resíduo acima da geomembrana de HDPE consta de:

- Camada de solo (de aproximadamente 1,30 m);
- Camada de resíduo (de aproximadamente 1,28 m);
- Camada de solo (de aproximadamente 0,5 m);

A camada de lixo encontrada, de aproximadamente 1,28m, continha muito lixo, pouco solo, sem muita presença de chorume, e um pouco menos seco que o lixo encontrado na cava E₁, como pode ser observado na Figura 3.5. Atingiu-se a última camada de solo e fez-se sondagem manual para localização da geomembrana de HDPE. Observou-se que na

escavação dos últimos 10,0 cm de solo acima da geomembrana de HDPE, cava E₂, esta apresentou estufamento em vários pontos o que refletiu a presença de gás abaixo da geomembrana. Retiraram-se os últimos 5,0 cm de solo acima da geomembrana de HDPE, com enxadas sem proteção na lâmina. Retirado todo o solo acima da geomembrana, esta apresentou-se completamente estufada, como pode ser visto na Figura 31.6. Provavelmente, isto se justifica pelo fato do aterro experimental ter sido construído acima do aterro A₁, já desativado. Uma possível movimentação do aterro pode ter causado trincamento no material de cobertura, podendo ter ocorrido migração do gás por estas trincas do material de cobertura, e não pelos drenos.



Figura 3.5. Lixo retirado da Cava E₂, impermeabilizada com geomembrana de HDPE.



Figura 3.6. Geomembrana de HDPE, estufada devido à presença de gás.

A geomembrana de HDPE foi cortada utilizando estilete apropriado e retirada uma seção de 2,70 m² (1,5 m x 1,8 m). Durante a retirada da amostra houve saída de gás. A geomembrana de PVC foi cortada utilizando tesoura, retirando-se uma seção de 2,42 m² (1,10 m x 2,20 m).

Após o corte e retirada do material foi coletada amostra de solo (cerca de 20 kg) das camadas da fundação e proteção das geomembranas, tomando extremo cuidado para que não ocorresse a contaminação do solo por resíduos, chorume, líquidos, etc. Antes da coleta de amostras de solo foi executado ensaio para determinação da densidade e umidade *in situ* do solo de fundação, através de cravação de cilindro padrão. A amostra foi condicionada em sacos plásticos resistentes, devidamente lacrados e identificados, os quais foram conduzidos ao laboratório. As geomembranas foram igualmente embaladas e identificadas e encaminhadas ao laboratório. Finalizados os trabalhos de coleta e retiradas das amostras, foram repostos os materiais. Primeiramente regularizou-se a superfície com solo de empréstimo, seguindo a colocação do “manchão” de geomembrana similar à coletada, garantindo a emenda do mesmo à geomembrana instalada por solda térmica, no caso da geomembrana de HDPE e solda fria (solvente) para a geomembrana de PVC.

Foram realizados diversos ensaios químicos com as amostras de solo, que serão objeto de análise em trabalho complementar, razão pela qual não são incluídos neste trabalho.

3.2.2 Aterro de Resíduo Classe I

Com o objetivo de avaliar o comportamento em longo prazo da geomembrana utilizada no sistema de impermeabilização de um aterro sanitário de resíduo classe I, foi realizada uma campanha de amostragem após 12 anos de utilização.

O aterro sanitário é composto de resíduos provenientes da indústria de tintas, classificado segundo a norma brasileira ABNT 10.004/87 como resíduo classe I, que correspondem aos resíduos que apresentam periculosidade por inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade. O sistema de fundação é composto por uma camada de solo argiloso e uma geomembrana de PVC de 1,0 mm, com uma das faces texturizada. Na tentativa de ilustrar a degradação ocorrida na amostra de PVC, utilizou-se, como referência, uma amostra do material de mesma fabricação que a manta utilizada no aterro, visto que não se dispunha de nenhum remanescente da amostra utilizada na época da construção.

3.3 Ensaio realizados

As geomembranas foram testadas através de ensaios físicos (determinação de espessura, densidade e peso) e ensaios mecânicos (determinação da resistência à tração, rasgo e ao puncionamento). Foram realizados alguns ensaios térmicos, no Departamento de Física da Universidade do Estado de São Paulo – UNESP, localizada na cidade de Presidente Prudente, que proporcionaram a identificação química das geomembranas com o objetivo de identificar alguma degradação da resina ou a perda de algum tipo de aditivo utilizado na sua formulação. Estes ensaios constam da determinação de Análise Diferencial de Varredura - DSC, para o HDPE, e Análise Termogravimétrica - TGA para o PVC. Todos os ensaios foram realizados de acordo com normas da ASTM, a seguir listadas. Faz-se a observação que as amostras virgens ensaiadas, não correspondem ao mesmo lote utilizado no sistema de impermeabilização do aterro experimental e no sistema de impermeabilização do aterro classe I.

Os ensaios realizados e o número de corpos de prova utilizados consistiram em:

Ensaio físicos:

- a) Determinação da espessura média (ASTM D5119, recomenda pela GM13), aplicando-se uma tensão de 20 kPa para o PVC e de 50 kPa para as geomembranas de HDPE: 10 corpos de prova;
- b) Determinação da densidade (ASTM D 1505) e gramatura (ASTM D 1910): 10 corpos de prova;

Ensaio mecânicos

- c) Ensaio de resistência à tração (ASTM D638): 5 corpos de prova em cada direção;
- d) Ensaio de resistência ao rasgo (ASTM 1004): 10 corpos de prova em cada direção;
- e) Ensaio de resistência ao puncionamento (ASTM D4833): 15 corpos de prova;

Ensaio térmicos

- f) Análise Diferencial de Varredura - DSC (ASTM D 3417), realizado nas amostras de HDPE;
- g) Análise Termogravimétrica - TGA, realizados nas amostras de PVC, segundo RIGO & CAZZUFFI, 1991;

O número de corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos realizados nas amostras submetidas ao envelhecimento acelerado por exposição à temperatura elevada, nas amostras imersas em óleo diesel, gasolina, nas amostras levadas à lagoa de chorume e nas amostras virgens de HDPE de 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “A”, seguiu o sugerido no método 9090 da EPA (tração e rasgo - 3 corpos de prova em cada direção e punção - 2 corpos de prova).

3.3.1 Descrição dos ensaios realizados

3.3.1.1 Ensaio de tração

Nos ensaios de tração, de acordo com a norma da ASTM D 638, utilizou-se uma máquina universal de fabricação EMIC, com capacidade de ampla faixa de alongamento permitindo levar a amostra até a ruptura, sob velocidade de deformação constante, de 50 mm/min. Utilizou-se amostra na forma de “Dumbbell”, do Tipo VI, segundo sugerido na norma 638, e para obtenção de corpos de prova uniformes foram confeccionados moldes biselados, conforme ilustrado na Figura 3.7.

Obtiveram-se da curva tensão-deformação os seguintes dados quantitativos:

- Resistência à tração na ruptura (σ_p) - (definida como tensão máxima para o PVC e de escoamento para o HDPE);
- Deformação correspondente (ϵ_p);
- Módulo de elasticidade (E), referente à inclinação da porção inicial da curva.

Para as geomembranas de PVC estas curvas, geralmente, caracterizam-se por uma tensão máxima, correspondente à ruptura atingida para um determinado valor de deformação. Segundo Koerner, 1997, esses valores são da ordem de 21 MPa de tensão na ruptura e 480% de deformação. Já as geomembranas de HDPE apresentam uma tensão de escoamento (*yield stress*) rotineiramente tomada como a tensão de ruptura, da ordem de 18 MPa, associada a uma deformação de aproximadamente 17%. Esta tensão de escoamento tende a decrescer ligeiramente até deformações da ordem de 500%. Caso se continue a carregar, ocorre finalmente a ruptura física para deformações de aproximadamente 1000%.



Figura 3.7. Molde biselado utilizado para obtenção dos corpos de prova para o ensaio de tração (Tipo IV).

3.3.1.2. Ensaio de rasgo

O ensaio de rasgo foi realizado de acordo com a norma ASTM D 1004, indicada para geomembranas termoplásticas. Utilizou-se amostra na forma indicada na Figura 3.8, a qual apresenta um ângulo de 90° , onde ocorre uma concentração de tensão e o rasgo começa a se propagar. De acordo com este ensaio, mede-se a resistência inicial ao rasgo. As duas extremidades da amostra são fixadas à garra e ensaiadas na prensa utilizada no ensaio de tração. O rasgo se propaga ao longo da direção perpendicular de aplicação da carga, à 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 %, medida sob tensão de 175 kPa.

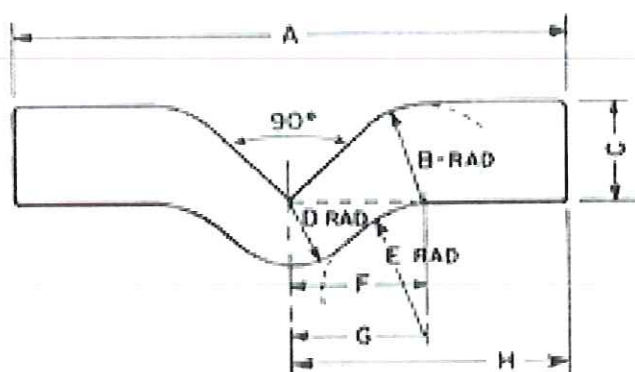


Figura 3.8. Forma da amostra do ensaio ao rasgo de acordo com ASTM D 1004.

Os corpos de prova foram cortados utilizando-se o molde apresentado na Figura 3.9.

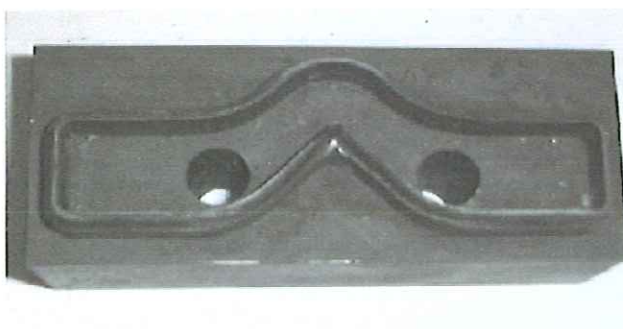


Figura 3.9. Molde biselado utilizado para obtenção dos corpos de prova para o ensaio de rasgo, de acordo com a ASTM D 1004.

3.3.1.3 Ensaio de punção

Na realização do ensaio de puncionamento, de acordo com a norma ASTM D4833, 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. Uma barra de 8 mm de diâmetro com a extremidade chanfrada é pressionada no centro da geomembrana, até provocar seu puncionamento. A Figura 3.10 ilustra o equipamento utilizado no ensaio. A velocidade de aplicação da carga utilizada foi de 300 mm/min. A resistência ao puncionamento é tomada como a carga máxima registrada durante o ensaio, registrando-se também a deflexão correspondente.



Figura 3.10. Equipamento utilizado no ensaio de punção, segundo a norma da ASTM D 4833.

3.3.1.4 Análise Termo-Diferencial (DSC)

No ensaio de DSC, segundo a norma da ASTM D 3417, utilizou-se um equipamento fabricado pela NETZSCH, série DSC 204, do laboratório de Análises Térmicas da UNESP de Presidente Prudente. Uma pequena amostra de geomembrana, de 2 a 3 gramas, é submetida a um fluxo térmico em um recipiente saturado com nitrogênio em estado gasoso usando vazão de fluxo de 30 cm³/min. As amostras de polietileno foram aquecidas em condições que permitiram atingir a temperatura de 200 °C, a uma velocidade de 10 °C por minuto de maneira que foi possível observar seu derretimento. Todo o fenômeno consiste na produção ou absorção de calor pela amostra, apresentando pico endo ou exo-térmico no diagrama temperatura *versus* velocidade de fluxo térmico.

O ensaio de DSC é geralmente usado para identificação e como controle de qualidade da geomembrana. Foram obtidos do ensaio os seguintes parâmetros:

- Temperatura de fusão (corresponde ao pico endotérmico);
- Entalpia de fusão (ΔH), correspondente à área sob o pico de derretimento e;
- Porcentagem de cristalinidade.

A porcentagem de cristalinidade é calculada, em função da taxa de cristalinidade (ΔH), a qual representa a quantidade de cristalinidade do polímero. Comparando o valor de ΔH da amostra ensaiada com um valor de ΔH teórico, referente a um polímero 100 % cristalino (este valor é 258 J/g para o HDPE), obtém-se a porcentagem de cristalinidade da amostra.

3.3.1.5 Análise Termogravimétrica (TGA)

O ensaio de TGA permite caracterizar os materiais poliméricos, em função da perda de massa com o aumento de temperatura. Utilizou-se um equipamento fabricado pela NETZSCH, série TG 209, do laboratório de Análises Térmicas da UNESP de Presidente Prudente. Uma pequena amostra é aquecida, com velocidade de 10 °C por minuto, até atingir a temperatura de 800 °C, em uma atmosfera saturada de nitrogênio. Os resultados são apresentados em gráficos que contêm o peso em porcentagem *versus* a temperatura. Um pronunciado decréscimo de peso a uma determinada temperatura significa a vaporização de um componente específico.

Segundo HALSE & RIGO, (1991), para o PVC, estas curvas apresentam dois processos de decomposição às temperaturas de 270 e 352 °C aproximadamente. O primeiro processo



inclui a deidrohalogenização dos polímeros (perda de HCl do polímero) e a degradação dos plastificantes. O segundo processo corresponde à degradação dos polímeros, ou seja, à porcentagem do polímero residual. Após este processo ser completado introduz-se ar para oxidar o negro de fumo e a resina carbonácea. O resíduo final corresponde ao teor de cinza. No presente caso, o ensaio foi realizado sob atmosfera nitrogenada durante todo o tempo, assim, acredita-se que o que foi removido acima de 500 °C, seja provavelmente, negro de fumo e o resíduo polimérico carbonáceo, além do teor de cinza. Foram obtidos do ensaio de TGA os seguintes parâmetros:

- (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.

Considerando que as geomembranas de PVC contêm um elevado teor de plastificante, (aproximadamente 30 %), os ensaios de TGA foram realizados com o objetivo de quantificar a perda de plastificante e de associar esta variação às mudanças ocorridas nas propriedades mecânicas medidas. A interpretação dos resultados obtidos no ensaio de TGA foi, então, em função das variações ocorridas no primeiro processo de derretimento, isto é, no parâmetro (A). Foi feita uma comparação entre as amostras virgens e as amostras submetidas à degradação.

Durante a realização do ensaio promoveu-se o aquecimento gradativo da amostra, obtendo-se o parâmetro (A) para uma temperatura de aproximadamente 260 °C. Caso estivesse paralisado o aquecimento em 200 °C teria sido possível determinar de forma mais precisa a perda de plastificante. Como tal não ocorreu, mediu-se conjuntamente a degradação do plastificante e a deidrohalogenização da resina polimérica. Dessa forma, os valores obtidos no ensaio de TGA não permitiram identificar pequenas perdas de plastificante.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1- Amostras virgens

Os ensaios físicos constaram da determinação da espessura, densidade e gramatura em 10 corpos de prova de cada amostra, de acordo com as normas da ASTM. Para avaliar a variabilidade inerente a cada ensaio, determinou-se o coeficiente de variação (CV), definido como a relação entre o desvio padrão e a média, para cada parâmetro analisado. A Tabela 4.1 apresenta os resultados médios obtidos e os respectivos coeficientes de variação (CV).

TABELA 4.1. Resultados médios dos ensaios físicos realizados em amostras virgens de geomembranas de PVC e HDPE e os respectivos coeficientes de variação.

Ensaio	Espessura		Gramatura		Densidade	
Normas	ASTM D 5199		ASTM D 1910		ASTM D 792	
PVC 1,0 mm Lote I	Valor médio (cm)	0,988	Valor médio (g/cm ²)	0,121	Valor médio	1,231
	CV (%)	0,83	CV (%)	0,66	CV (%)	0,83
PVC 2,0 mm Lote I	Valor médio (cm)	2,039	Valor médio (g/cm ²)	0,250	Valor médio	1,231
	CV (%)	0,51	CV (%)	0,70	CV (%)	0,44
PVC 1,0 mm Lote II	Valor médio (cm)	0,978	Valor médio (g/cm ²)	0,119	Valor médio	1,221
	CV (%)	1,14	CV (%)	1,57	CV (%)	0,83
PVC 2,0 mm Lote II	Valor médio (cm)	2,023	Valor médio (g/cm ²)	0,249	Valor médio	1,231
	CV (%)	0,91	CV (%)	1,17	CV (%)	0,44
HDPE 1,0 mm Fornecedor "A"	Valor médio (cm)	0,974	Valor médio (g/cm ²)	0,104	Valor médio	1,063
	CV (%)	2,94	CV (%)	2,97	CV (%)	0,09
HDPE 1,5 mm Fornecedor "A"	Valor médio (cm)	1,593	Valor médio (g/cm ²)	0,171	Valor médio	1,073
	CV (%)	0,94	CV (%)	0,94	CV (%)	2,32
HDPE 1,0 mm Fornecedor "B"	Valor médio (cm)	0,983	Valor médio (g/cm ²)	0,104	Valor médio	1,054
	CV (%)	2,17	CV (%)	2,08	CV (%)	0,20
HDPE 1,5 mm Fornecedor "B"	Valor médio (cm)	1,621	Valor médio (g/cm ²)	0,170	Valor médio	1,048
	CV (%)	0,91	CV (%)	0,91	CV (%)	0,05

Realizaram-se os ensaios de tração, punção e rasgo nas amostras virgens (PVC Lote I e II e HDPE fornecedores “A” e “B”), de acordo com o as normas da ASTM. Os gráficos obtidos em cada ensaio são apresentados nas Figuras 4.1 a 4.20. As Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os valores médios dos parâmetros obtidos, os respectivos coeficientes de variação e o número de corpos de prova utilizados em cada ensaio realizado nas amostras virgens, assim como as normas utilizadas.

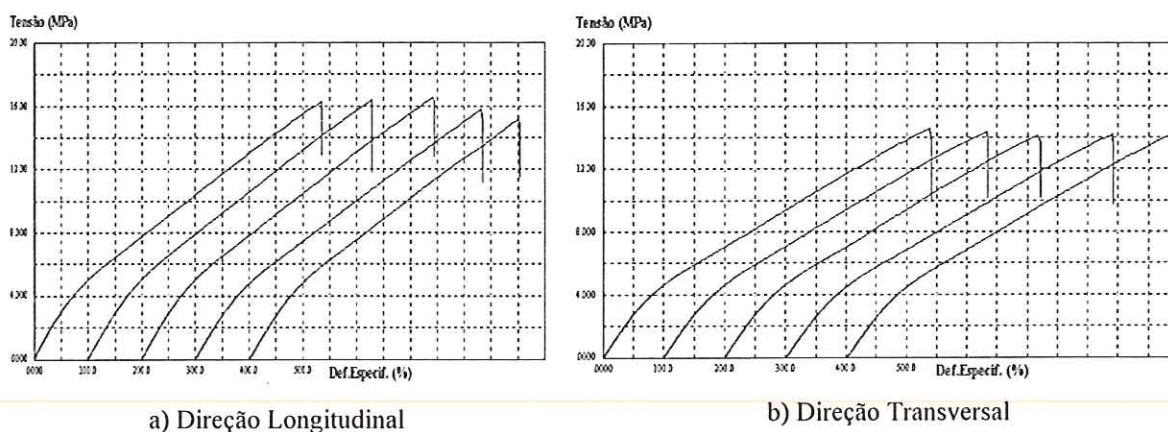


Figura 4.1. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 mm do lote I, nas duas direções ensaiadas.

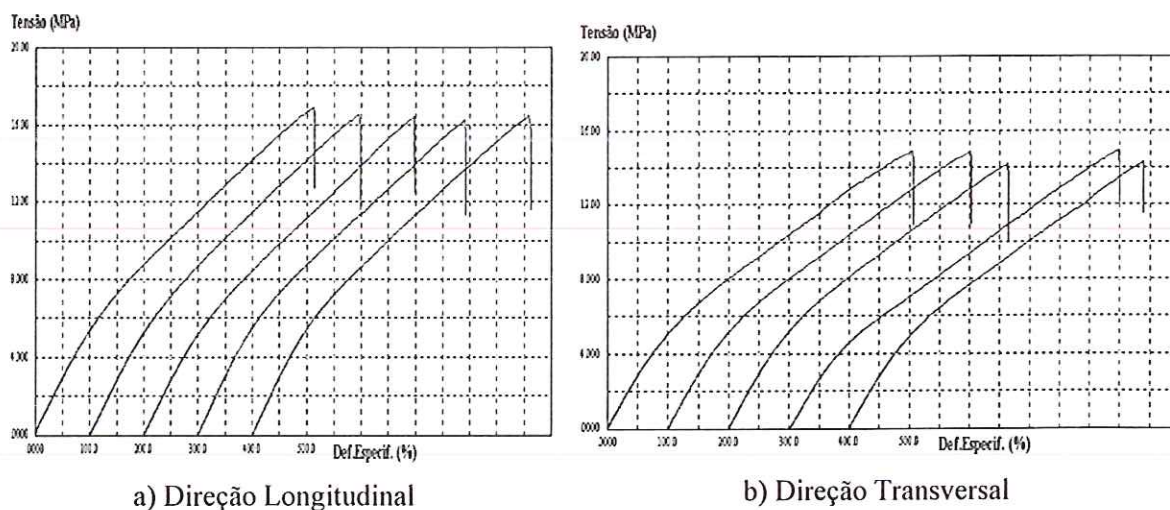
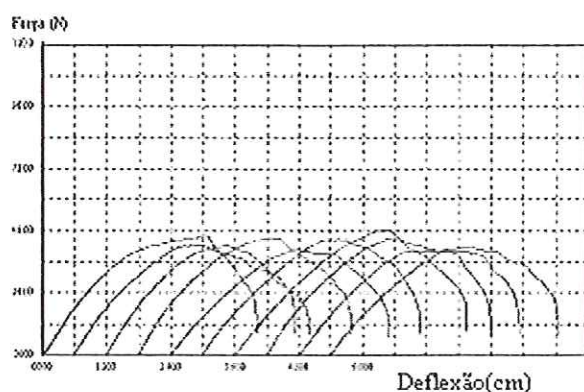
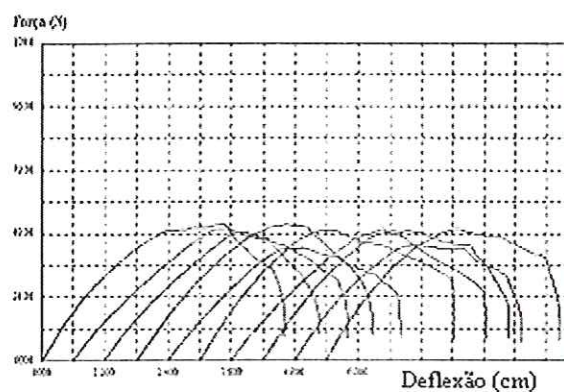


Figura 4.2. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de PVC de 2,0 mm do lote I, nas duas direções ensaiadas.

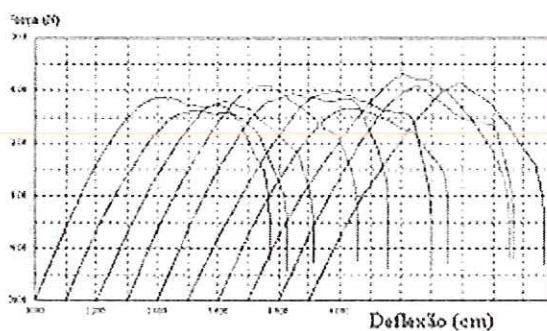


a) Direção Longitudinal

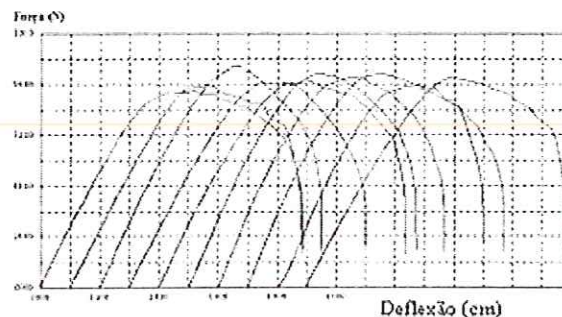


b) Direção transversal

Figura 4.3. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0mm do lote I, nas duas direções ensaiadas.

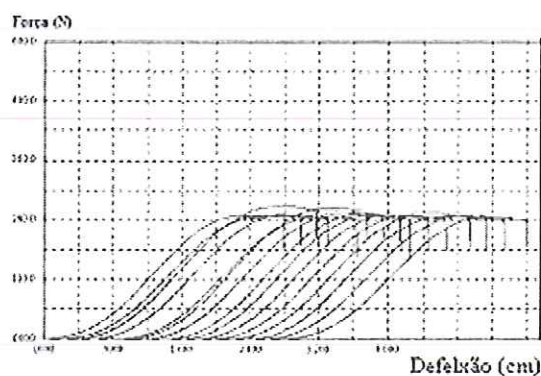


a) Direção Longitudinal

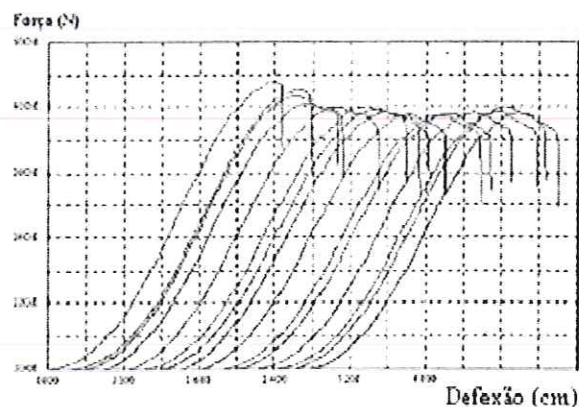


b) Direção Transversal

Figura 4.4. Gráfico força *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de PVC de 2,0 mm, do lote I, nas duas direções ensaiadas.



a) PVC 1,0 mm

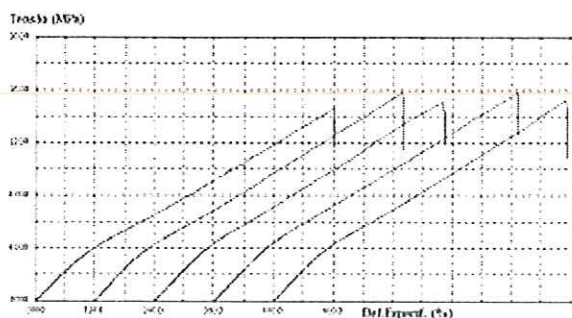


b) PVC 2,0 mm

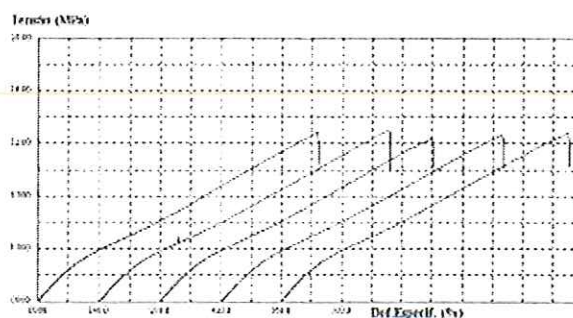
Figura 4.5. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm, do lote I.

TABELA 4.2. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm (Lote I).

Ensaio	Tração				Rasgo		Punção					
Norma	ASTM D 638				ASTM D 1004		ASTM D 4833					
Número de CP	5 CP cada direção				10 CP cada direção		15 CP					
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1,0 mm - Long	16,03	3,5	527,8	3,0	5,88	4,1	43,91	5,9	2,31	8,4	251,8	2,4
PVC 1,0 mm - Trans	14,32	1,2	535,1	2,0	5,56	3,5	48,60	6,2				
PVC 2,0 mm - Long	16,52	1,5	501,5	1,8	5,79	3,8	95,05	5,5	2,27	4,2	481,0	3,9
PVC 2,0 mm - Trans	14,61	2,5	501,4	6,1	5,78	3,6	98,43	3,4				

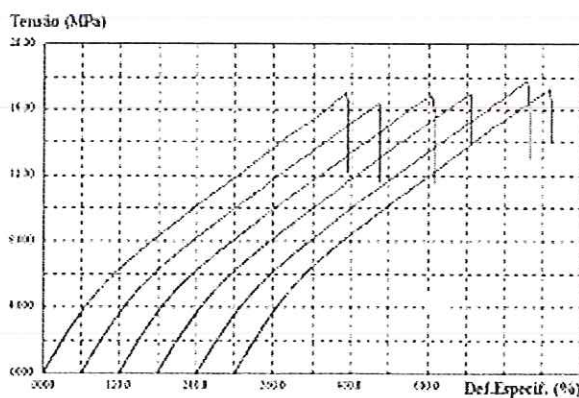


a) Direção Longitudinal

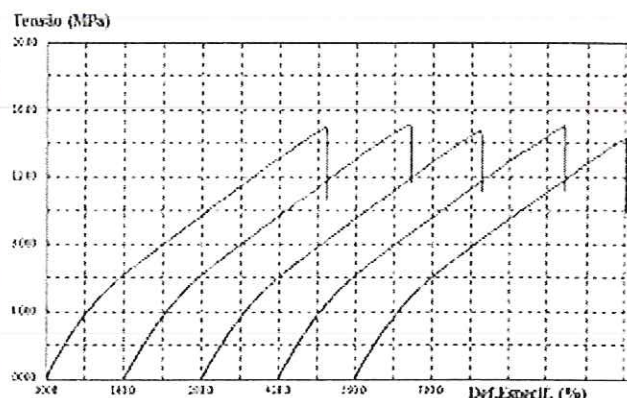


b) Direção transversal

Figura 4.6. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de PVC de 1,0 mm do lote II, nas duas direções ensaiadas.



a) Direção Longitudinal



b) Direção Transversal

Figura 4.7. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de PVC de 2,0 mm, do lote II, nas duas direções ensaiadas.

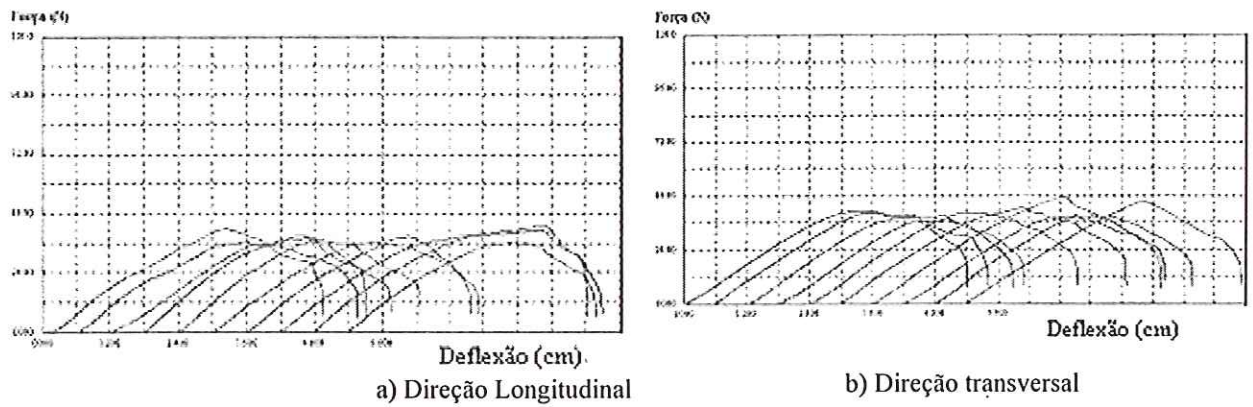


Figura 4.8. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 mm, do lote II, nas duas direções ensaiadas.

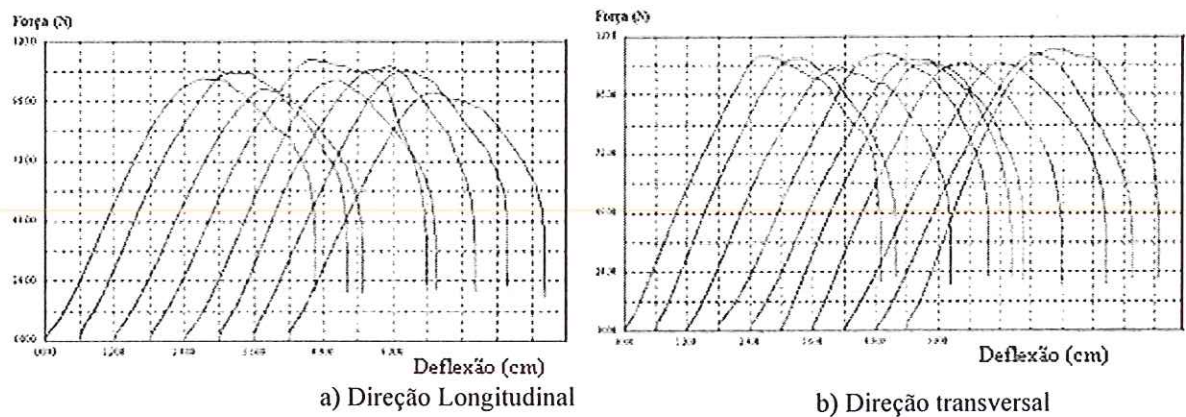


Figura 4.9. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de PVC de 2,0 mm, do lote II, nas duas direções ensaiadas.

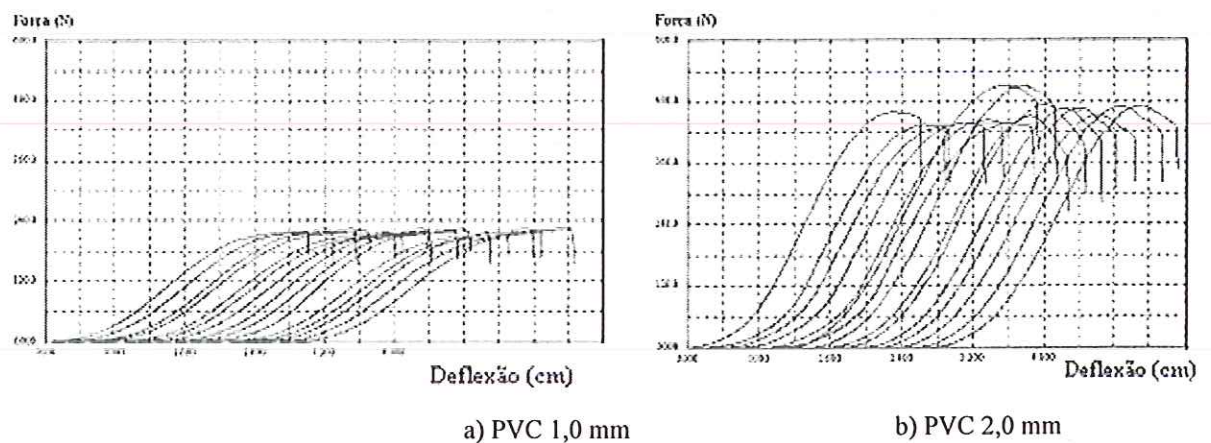
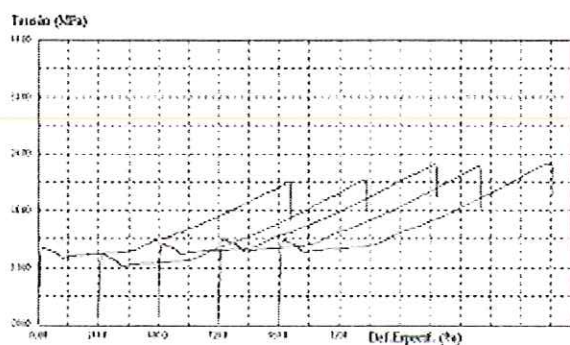


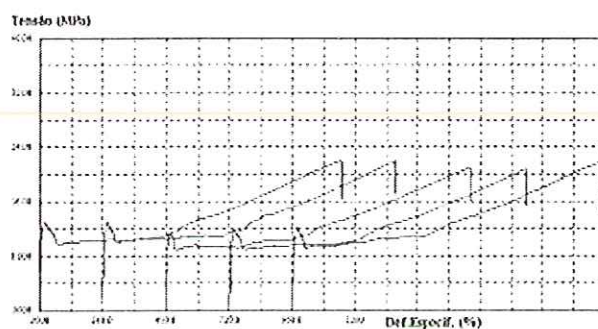
Figura 4.10. Gráfico tensão *versus* deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm, do lote II.

TABELA 4.3. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm (Lote II).

Ensaio	Tração						Rasgo		Punção			
Norma	ASTM D 638						ASTM D 1004		ASTM D 4833			
Número de CP	5 CP cada direção						10 CP cada direção		15 CP			
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV		
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)		
PVC 1,0 mm - Long	15,33	3,3	601,2	2,7	4,00	3,5	38,80	6,9	3,04	1,8	221,0	2,0
PVC 1,0 mm - Trans	12,79	1,8	651,4	2,5	3,63	1,9	41,12	7,7				
PVC 2,0 mm - Long	16,93	1,9	481,4	2,4	6,45	1,1	106,3	4,2	2,33	6,0	460,0	5,4
PVC 2,0 mm - Trans	14,88	2,0	508,2	2,2	5,74	3,1	110,7	2,1				

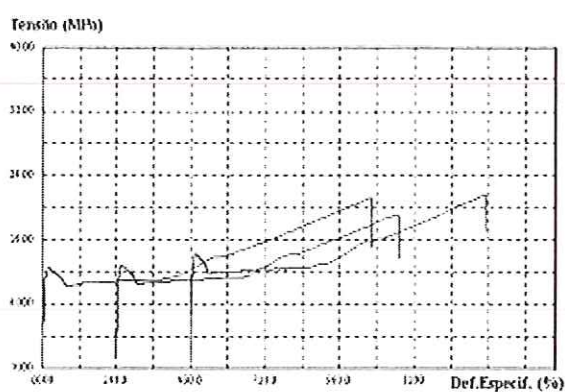


a) Direção Longitudinal

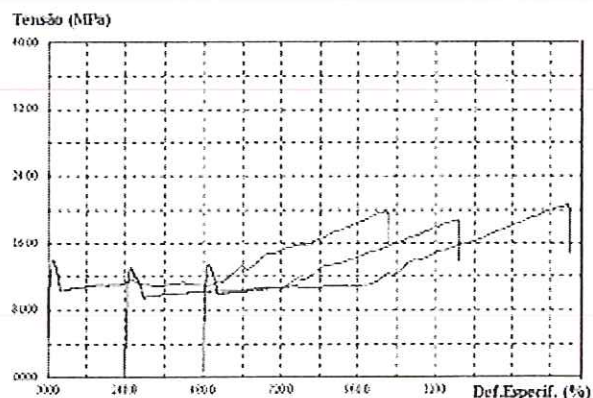


b) Direção Transversal

Figura 4.11. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante "A", nas duas direções ensaiadas.



a) Direção Longitudinal



b) Direção Transversal

Figura 4.12. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas mostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante "A", nas duas direções ensaiadas.

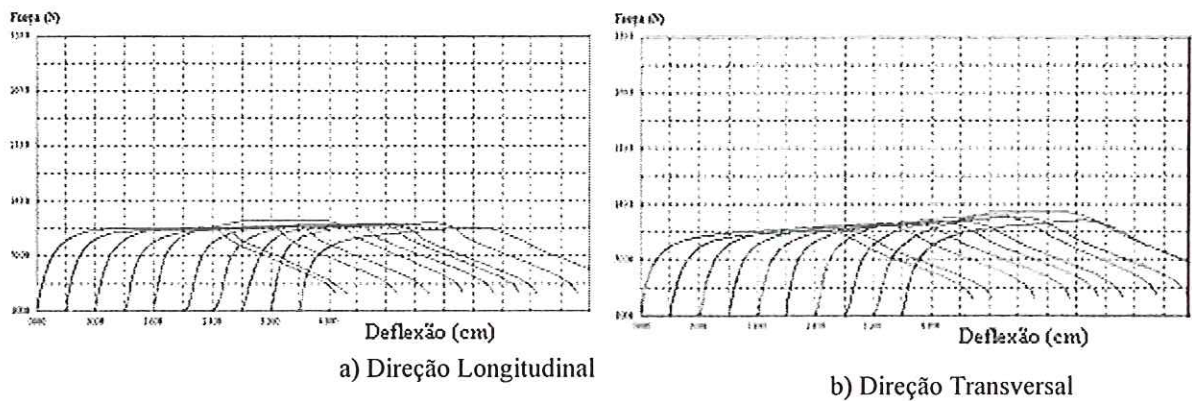


Figura 4.13. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “A”, nas duas direções ensaiadas.

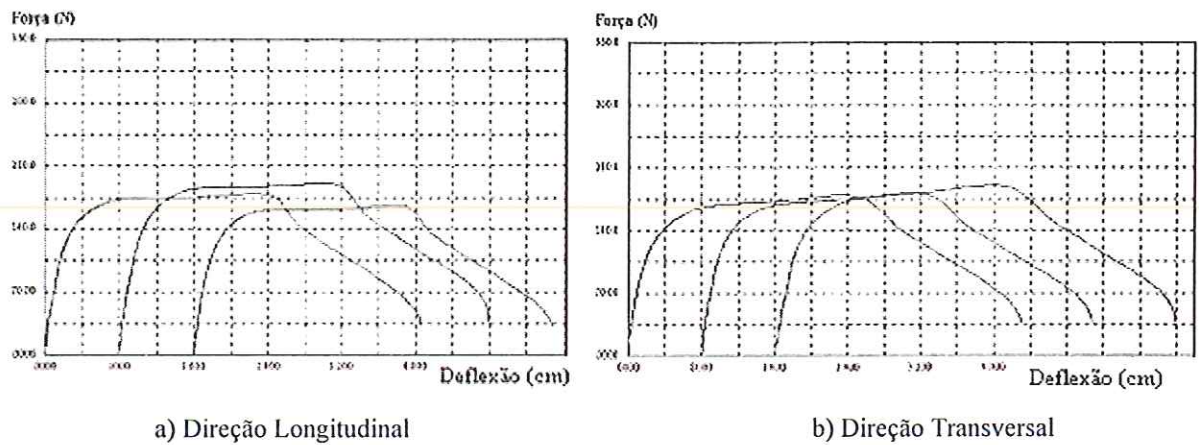


Figura 4.14. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “A”, nas duas direções ensaiadas.

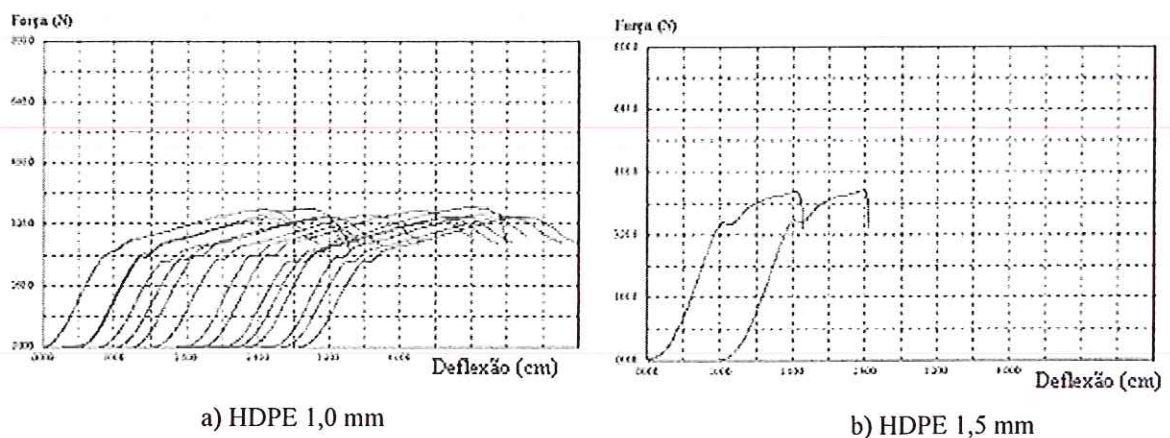
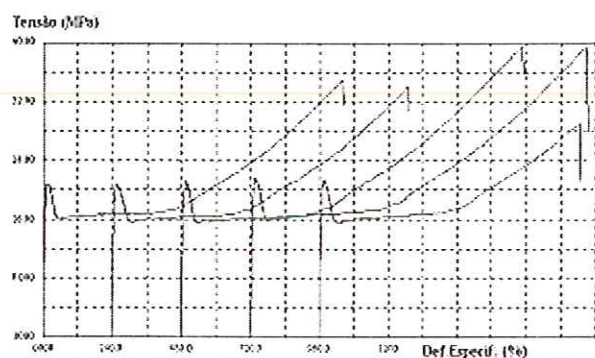


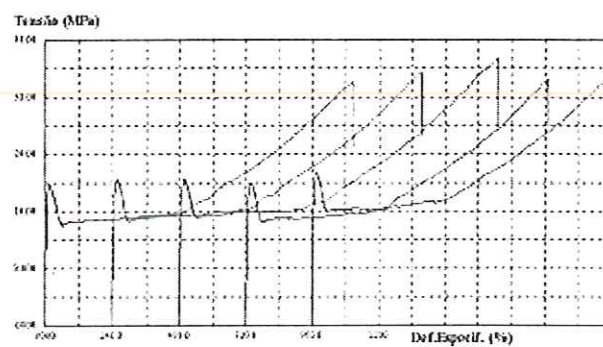
Figura 4.15. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “A”.

TABELA 4.4. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “A”.

Ensaio	Tração						Rasgo		Punção			
Norma	ASTM D 638						ASTM D 1004		ASTM D 4833			
Número de CP	3 CP cada direção						3 CP cada direção		2 CP			
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
HDPE 1,0 mm - Long	11,36	7,8	20,58	5,4	181,0	7,2	109,7	3,0	2,44	9,0	341,1	3,7
HDPE 1,0 mm - Trans	12,32	5,3	16,15	2,0	221,3	10,7	119,1	5,9				
HDPE 1,5 mm - Long	13,14	7,0	17,85	1,5	243,4	8,5	179,0	7,0	1,59	1,8	431,2	-
HDPE 1,5 mm - Trans	13,56	4,0	16,31	1,6	236,7	4,6	184,1	3,0				

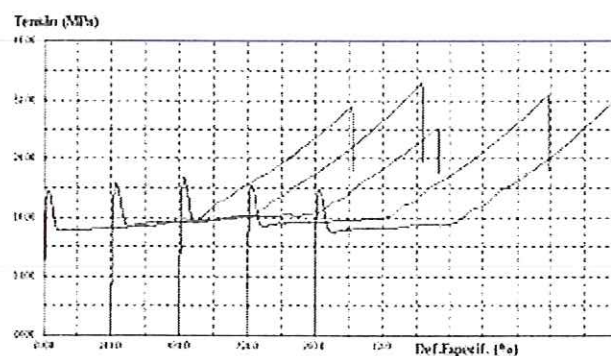


a) Direção Longitudinal

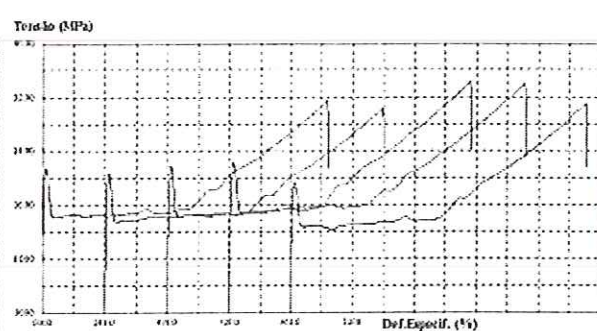


b) Direção Transversal

Figura 4.16. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.

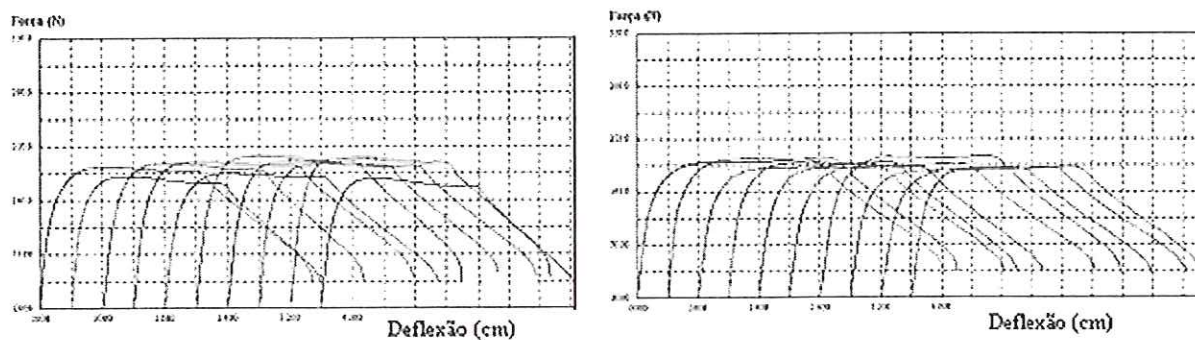


a) Direção Longitudinal



b) Direção Transversal

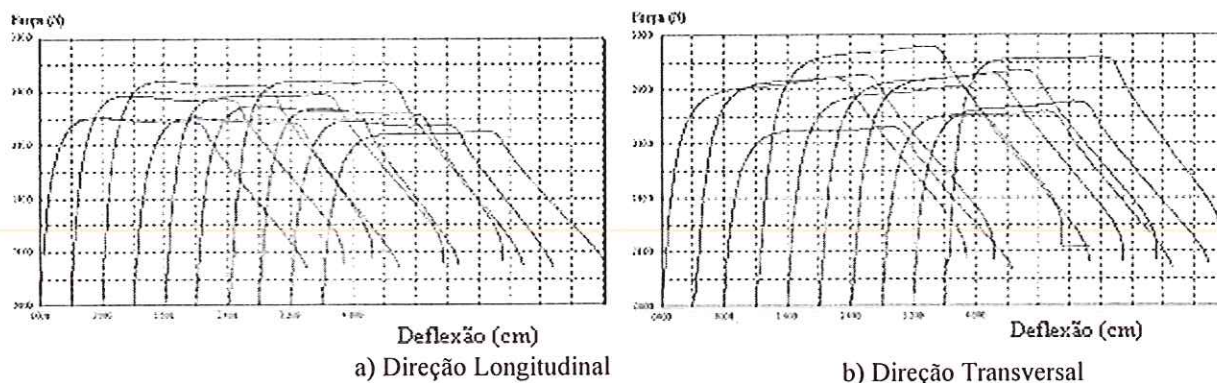
Figura 4.17. Gráfico tensão *versus* deformação obtido no ensaio de tração realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.



a) Direção Longitudinal

b) Direção Transversal

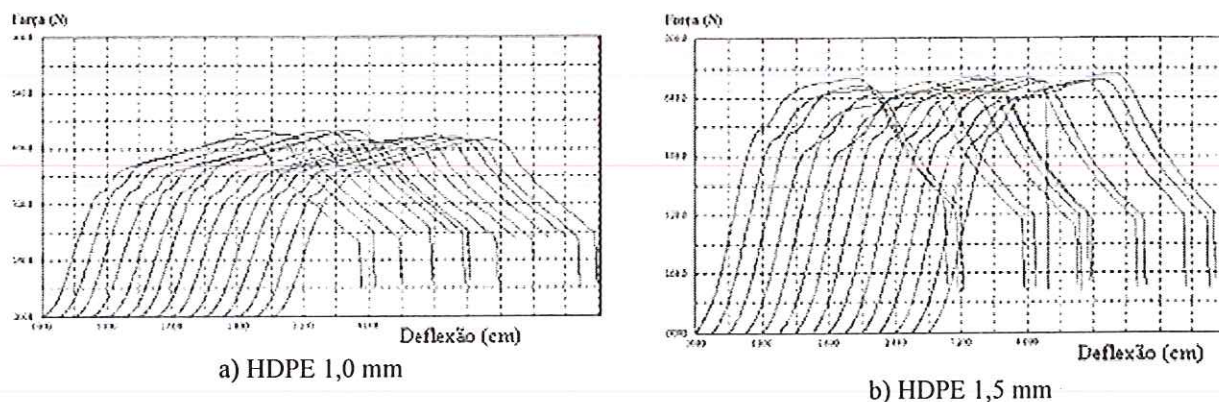
Figura 4.18. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.



a) Direção Longitudinal

b) Direção Transversal

Figura 4.19. Gráfico força *versus* deflexão obtido no ensaio de rasgo realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,5 mm do fabricante “B”, nas duas direções ensaiadas.



a) HDPE 1,0 mm

b) HDPE 1,5 mm

Figura 4.20. Gráfico tensão *versus* deflexão obtido no ensaio de punção realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 mm do fabricante “B”.

TABELA 4.5. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “B”.

Ensaio	Tração			Rasgo	Punção		
Norma	ASTM D638			ASTM D 1004	ASTM D 4833		
Número de CP	5 CP cada direção			10 CP cada direção	15 CP		
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	E	$F_{m\acute{a}x}$	Defl.	$F_{m\acute{a}x}$
	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(N)	(cm)	(N)
HDPE 1,0 mm - Long	21,15	1,7	16,06	466,6	184,9	2,56 3,4	516,9 1,8
HDPE 1,0 mm - Trans	20,45	3,0	15,97	507,7	178,3		
HDPE 1,5 mm - Long	20,45	3,6	15,32	491,9	262,2	2,03 10,2	682,0 2,1
HDPE 1,5 mm - Trans	21,07	5,4	14,22	489,6	289,0		

Pôde-se constatar que existe uma grande diferença entre as amostras de HDPE de mesma especificação e espessura fornecidas pelos dois fabricantes, como pode ser observado comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.4 e 5.5, que trazem os resultados obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados nas amostras virgens dos fabricantes “A” e “B”, respectivamente. Para melhor ilustrar esta diferença as Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam uma comparação dos resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras dos dois fabricantes.

De acordo com a Figura 4.21, as amostras de HDPE do fornecedor “B”, nas duas espessuras ensaiadas, apresentaram valores de resistência à tração superiores aos do fabricante “A”, da ordem de 86% na direção longitudinal e 66% na transversal para a espessura de 1,0 mm e aproximadamente 56%, nas duas direções, para a amostra de 1,5 mm.

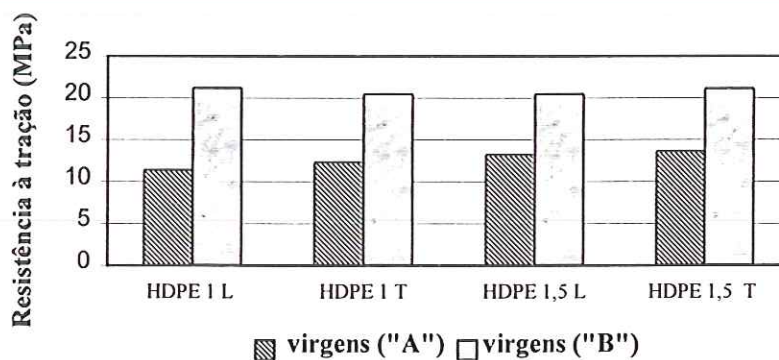


Figura 4.21. Resistência à tração: amostras virgens de HDPE cedidas pelos fabricantes “A” e “B”.

De acordo com a Figura 4.22, as amostras cedidas pelo fabricante "B" apresentaram menores valores de deformação na ruptura nas duas espessuras ensaiadas quando comparadas ao HDPE fornecido pelo fabricante "A". Para a amostra de 1,0 mm esta diferença de deformação foi da ordem de 22% na direção longitudinal e apenas 1% na transversal e para a amostra de 1,5 mm aproximadamente 13% nas duas direções.

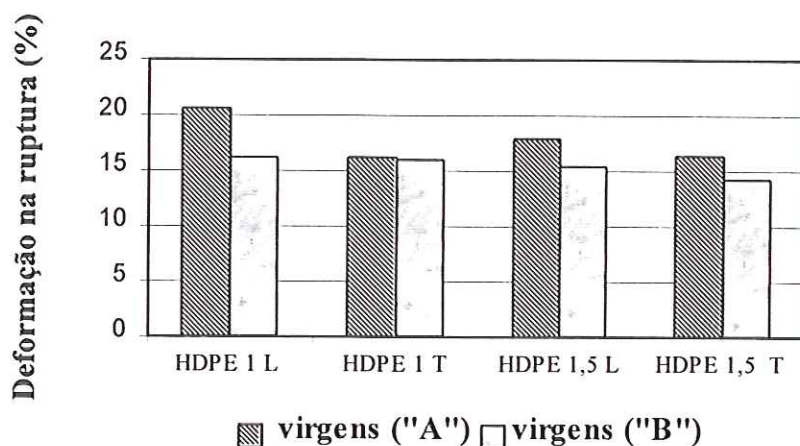


Figura 4.22. Deformação na ruptura: amostras virgens de HDPE cedidas pelos fabricantes "A" e "B".

Na análise do módulo de elasticidade, Figura 4.23, pode-se perceber que as amostras cedidas pelo fornecedor "B" apresentaram valores bem superiores aos encontrados nas amostras do fabricante "A", da ordem de 158% na direção longitudinal e 102% na transversal para a amostra de 1 mm e 130% e 107% nas direções longitudinais e transversais, respectivamente para a amostra de 1,5 mm.

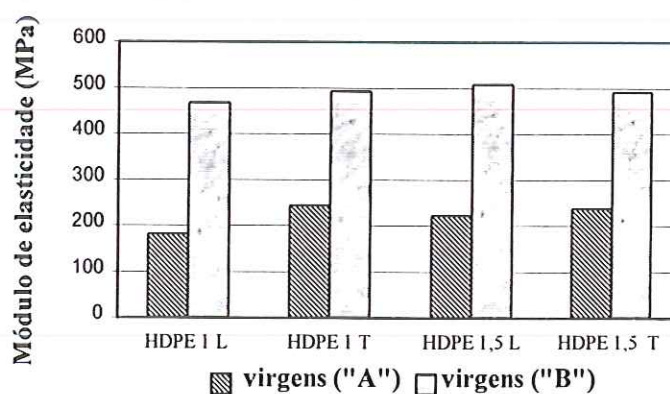


Figura 4.23. Módulo de elasticidade: amostras virgens de HDPE cedidas pelos fabricantes "A" e "B".

Ensaio de DSC – *Differential scanning calorimetry*

O ensaio de DSC foi realizado segundo a norma ASTM D 3417. Os gráficos obtidos para cada amostras estão ilustrados nas Figuras 4.24 e 4.25. Os resultados encontrados constaram de temperatura de fusão, entalpia de fusão (ΔH) e porcentagem de cristalinidade de acordo com o apresentado na Tabela 4.6.

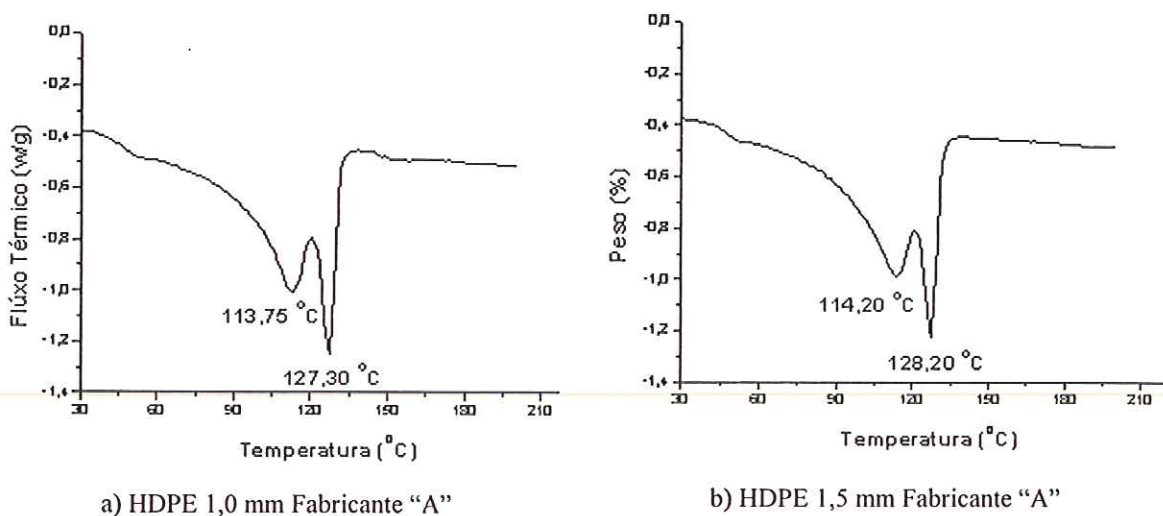


Figura 4.24. Gráfico obtido no ensaio de DSC, realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante "A".

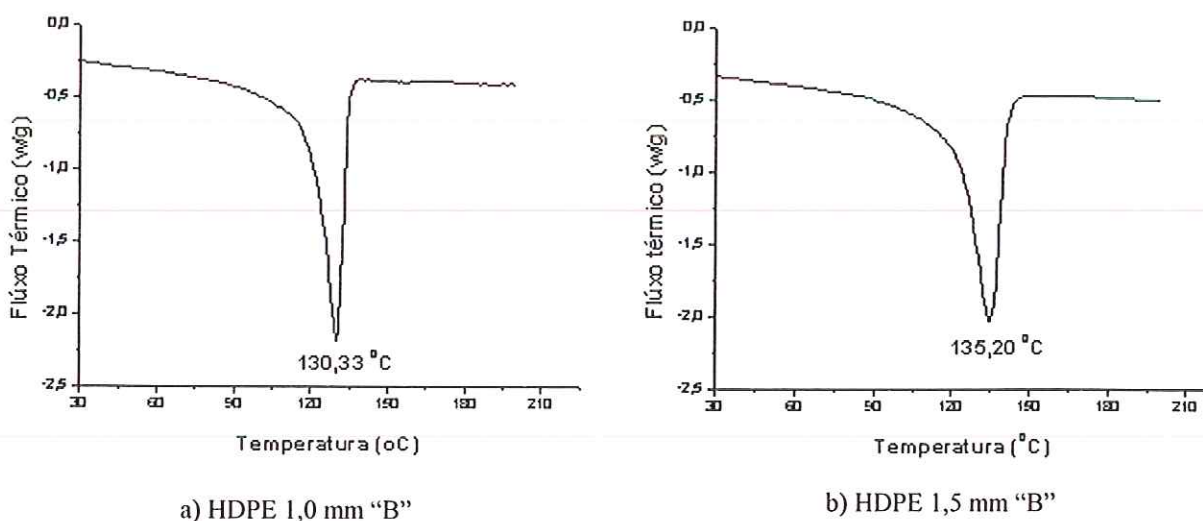


Figura 4.25. Gráfico obtido no ensaio de DSC, realizado nas amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante "B".

TABELA 4.6. Resultados obtidos no ensaio de DSC nas amostras virgens de HDPE.

Parâmetros medidos	Temperatura de fusão (°C)		Entalpia de fusão (ΔH) (J/g)	% de cristalinidade
HDPE 1,0 mm Fornecedor "A"	113,75	127,30	133,7	46,9
HDPE 1,5 mm Fornecedor "A"	114,20	128,20	127,1	44,6
HDPE 1,0 mm Fornecedor "B"	130,33		125,7	44,1
HDPE 1,5 mm Fornecedor "B"	135,30		144,4	50,7

No ensaio de DSC, as geomembranas de polietileno apresentam pico simples de fusão, à temperatura de aproximadamente 128 °C. Este comportamento pôde ser observado para as amostras de HDPE do fabricante "B", de acordo com o apresentado na Figura 4.25. Porém as amostras fornecidas pelo fabricante "A" apresentaram picos duplos de fusão, como está ilustrado na Figura 4.24. Esta presença de picos duplos pode ter sido ocasionada pela mistura de dois polímeros diferentes. Possivelmente, as geomembranas do fornecedor "A" constituem uma mistura de polietileno de pesos moleculares diferentes. Outra possível explicação para esta presença de picos duplos é a recristalização da cadeia polimérica durante o derretimento. Esta diferença de comportamento observada nos resultados do ensaio de DSC, pode explicar a diferença significativa de comportamento à tração observada entre as amostras dos fornecedores "A" e "B".

Análise termogravimétrica - TGA

Os gráficos obtidos no ensaio de TGA realizado nas amostras virgens de PVC estão apresentados nas Figuras 4.26 e 4.27, para as geomembranas de 1,0 e 2,0 mm, respectivamente.

A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos em cada ensaio, que são constantes de:

- (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.

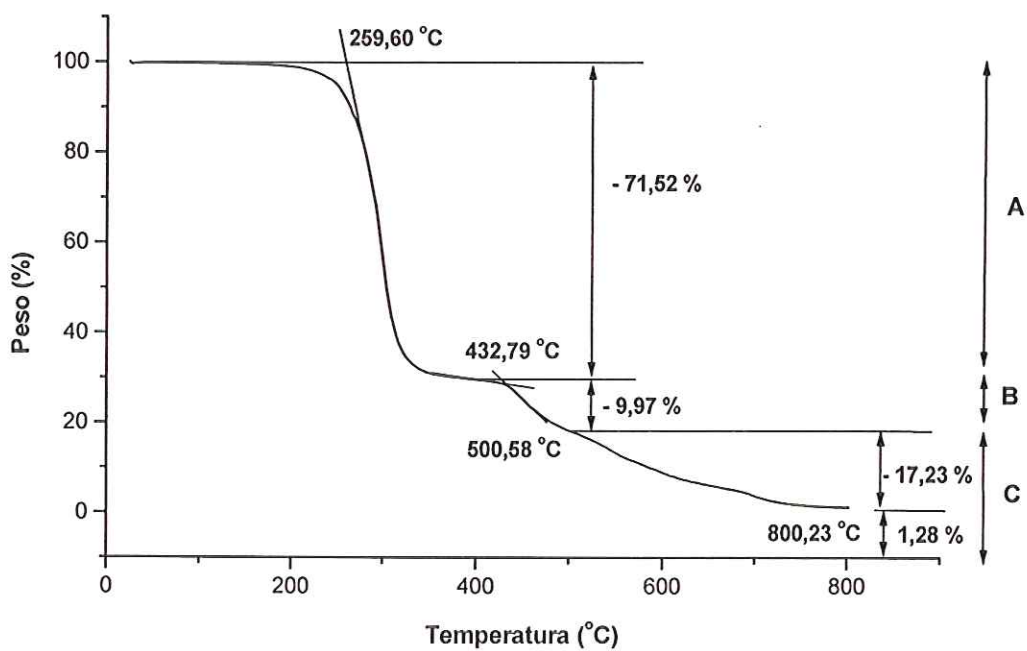


Figura 4.26. Ensaio de TGA. PVC 1,0 mm, amostra virgem.

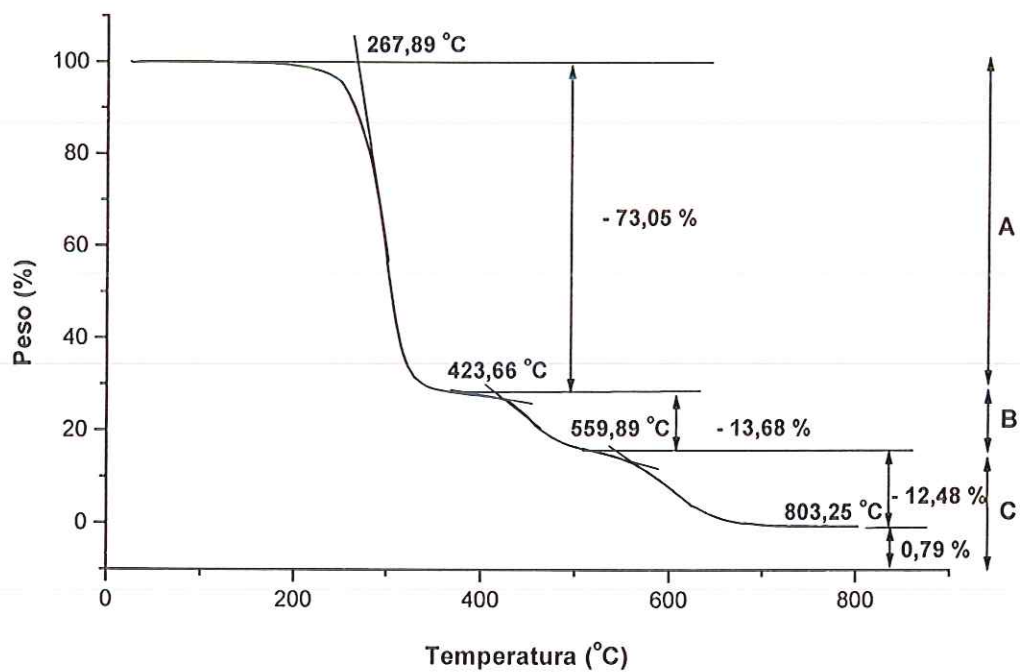


Figura 4.27. Ensaio de TGA. PVC 2,0 mm, amostra virgem.

TABELA 4.7. Resultados obtidos no ensaio de TGA, realizados nas amostras virgens de PVC.

Parâmetros medidos	A (%)	Temperatura (°C)	B (%)	Temperatura (°C)	C (%)	Temperatura (°C)
PVC 1,0 mm virgem	71,52	259,60	9,97	432,79	18,51	> 500 °C
PVC 2,0 mm virgem	73,05	267,89	13,68	432,66	13,29	> 500 °C

Segundo HALSE & RIGO, 1994, as amostras de PVC apresentam picos duplos de derretimento às temperaturas de aproximadamente 270 °C para o parâmetro (A) e 352 °C para o parâmetro (B).

Pôde-se observar, de acordo com as Figuras 4.26 e 4.27, que as amostras de PVC apresentam picos duplos de derretimento às temperaturas de 260 °C para o parâmetro (A) e 430 °C para o parâmetro (B) nas duas espessuras ensaiadas, portanto bastante próximos aos valores padrão reportados na literatura.

4.2 Aterro Experimental Bandeirantes

Para avaliar os efeitos da degradação natural nas amostras de geomembranas de PVC e HDPE de 1,0 mm retiradas do sistema de impermeabilização da base do Aterro Experimental, realizaram-se ensaios físicos, mecânicos e químicos e compararam-se os resultados com os mesmos parâmetros obtidos nas amostras virgens. Os valores obtidos para as amostras virgens foram tomados com o correspondente a 100 %, podendo-se desta forma, registrar um aumento nas propriedades medidas, representado por valores superiores a 100 % e uma diminuição, por valores inferiores a 100 %. Faz-se a ressalva que as amostras virgens foram cedidas pelos mesmos fabricantes das geomembranas utilizadas no Aterro Experimental, mas não correspondem aos mesmos lotes, uma vez que as amostras armazenadas na época da construção do aterro foram extraviadas. Admitiu-se para o PVC, como amostras virgens, os resultados referentes ao Lote II e para o HDPE as amostras fornecidas pelo fabricante "A".

Os ensaios físicos constaram apenas da determinação da espessura, e pôde-se observar que tanto o PVC como o HDPE apresentaram variações de espessura inferiores a 2 %.

A Tabela 4.8 mostra os resultados médios dos ensaios de tração, punção e rasgo e compararam-se estes resultados com os mesmos parâmetros encontrados nas amostras virgens (Tabelas 4.3 e 4.4), conforme se apresenta nas Figuras 4.28 a 4.34.

TABELA 4.8. Resultados médios obtidos no ensaio de tração, rasgo e punção realizados em amostras de PVC e HDPE de 1,0 mm retiradas do Aterro Experimental Bandeirantes, 18 meses após seu encerramento.

Ensaio	Tração						Rasgo		Punção			
Norma	ASTM D 638						ASTM D 1004		ASTMD 4833			
Número de CP	5 CP cada direção						10 CP cada direção		15 CP			
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1,0 mm - Long	20,38	4,6	467,1	7,4	10,45	4,5	59,76	4,4	2,27	3,7	343,5	2,7
PVC 1,0 mm - Trans	18,66	2,1	480,7	7,9	11,71	12,1	64,65	4,3				
HDPE 1,0 mm - Long	12,25	3,3	22,06	4,3	194,2	8,7	105,9	2,0	2,25	2,3	341,6	2,9
HDPE 1,0 mm - Trans	11,87	6,8	18,18	2,9	211,6	6,6	112,3	2,4				

Na análise dos resultados encontrados nos ensaios de tração, que se apresentam nas Figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31, tem-se que as geomembranas de PVC inseridas no aterro, apresentaram resistência à tração superior às amostras virgens (33% na direção longitudinal e 46 % na transversal), e deformação na ruptura inferior (22% na direção longitudinal e 26 % na transversal). O módulo de elasticidade revelou-se superior ao da amostra virgem em, aproximadamente, 161 % na direção longitudinal e 220 % na transversal. Para ilustrar essa variação do módulo de elasticidade, a Figura 4.31 mostra as curvas tensão-deformação para amostras de PVC de 1,0 mm, nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, sendo as curvas “A” correspondentes à amostra virgem, e as curvas “B”, às amostras retiradas do aterro experimental. Pode-se notar as alterações de inclinações do trecho inicial, observadas nas amostras retiradas do aterro.

As mantas de HDPE apresentaram resistência à tração ligeiramente superior à da amostra virgem em de 8 % na direção longitudinal e inferior em 4 % na transversal. A deformação na ruptura foi superior à da amostra virgem em, aproximadamente, 7 % na

direção longitudinal e 20% na transversal. O módulo de elasticidade apresentou valores ligeiramente superiores aos da amostra virgem na direção longitudinal (da ordem de 7%) e inferiores na direção transversal (da ordem de 5%).

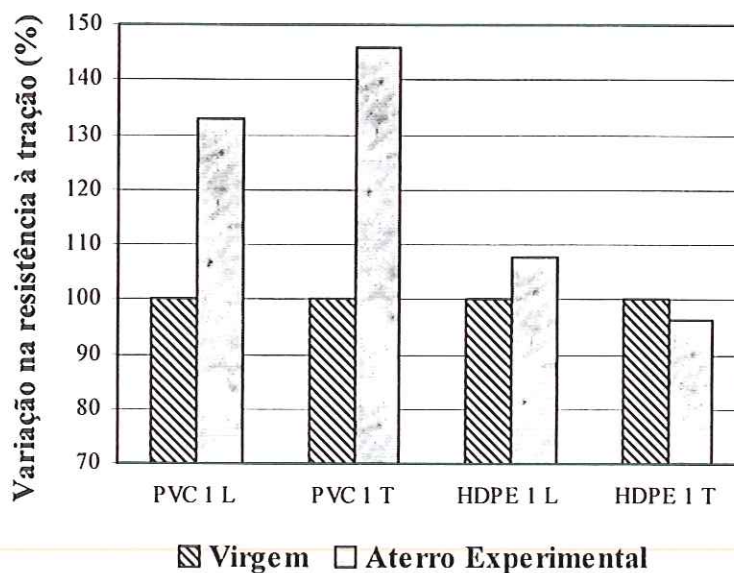


Figura 4.28. Resistência à tração: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.

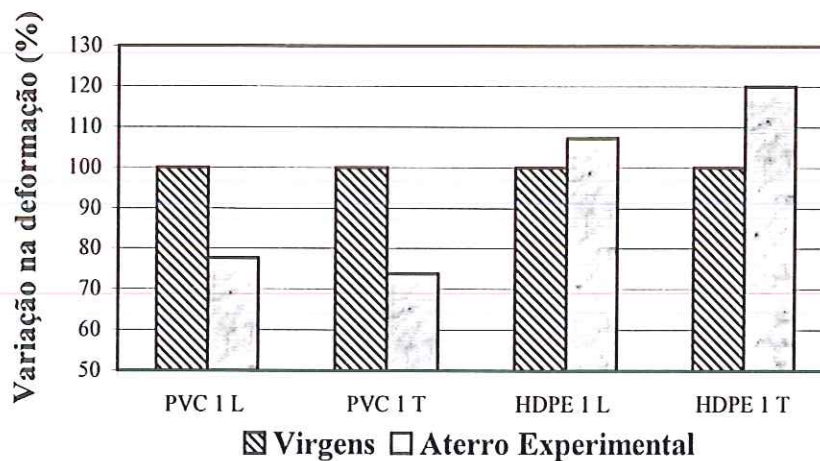


Figura 4.29. Deformação na ruptura: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.

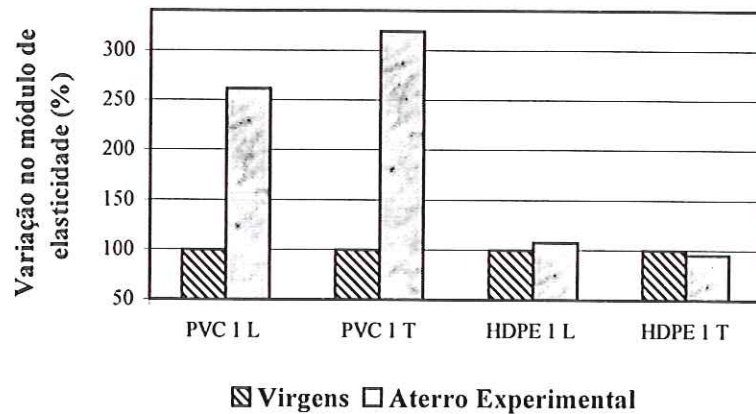


Figura 4.30. Módulo de elasticidade: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.

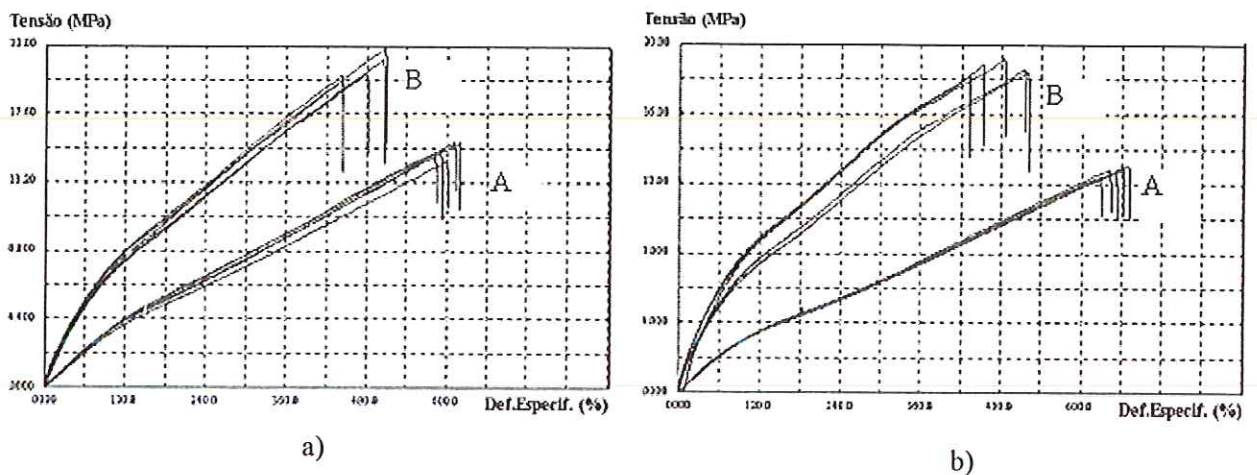


Figura 4.31. Curva tensão-deformação: comparação entre as amostras de PVC de 1,0 mm virgens e as amostras retiradas do Aterro Experimental nas duas direções ensaiadas. A - amostra virgem; B - amostra do Aterro Experimental.

De acordo com os resultados encontrados no ensaio de rasgo apresentados na Figura 4.32 pode-se observar que as mantas de PVC apresentaram resistência ao rasgo, aproximadamente, 55 % superior á da amostra virgem, nas duas direções ensaiadas, enquanto a geomembrana de HDPE não apresentou alteração significativa.

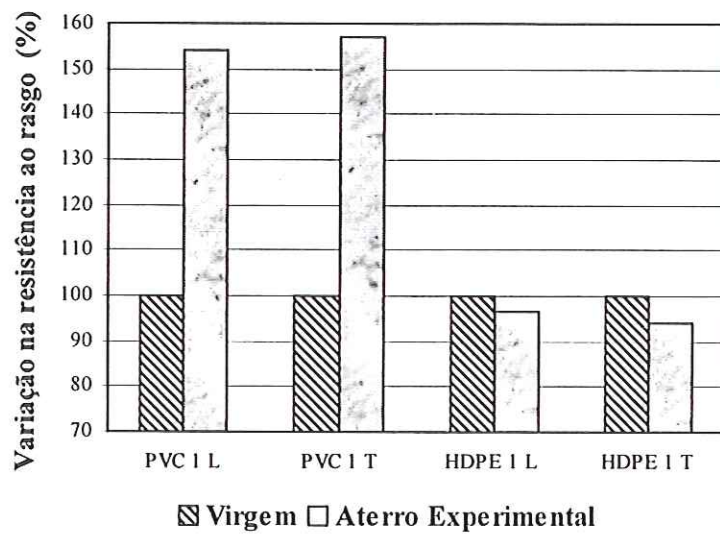


Figura 4.32. Resistência ao rasgo: amostras virgens comparadas às retiradas do Aterro Experimental.

Percebe-se, de acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4.33 e 4.34, que a manta de PVC apresentou resistência ao puncionamento superior à da amostra virgem em aproximadamente 55 %, enquanto a amostra de HDPE praticamente não apresentou variação. Na análise da variação da deflexão correspondente ao puncionamento, a geomembrana de PVC apresentou deflexão 25% inferior, aproximadamente, e a amostra de HDPE, 8%, quando comparadas às amostras virgens.

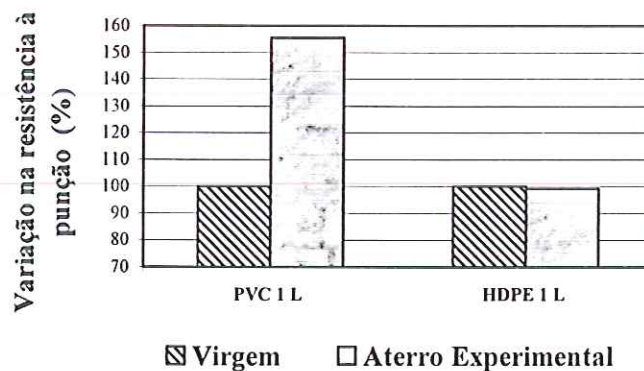


Figura 4.33. Resistência ao puncionamento: amostras virgens comparadas às retiradas do aterro experimental

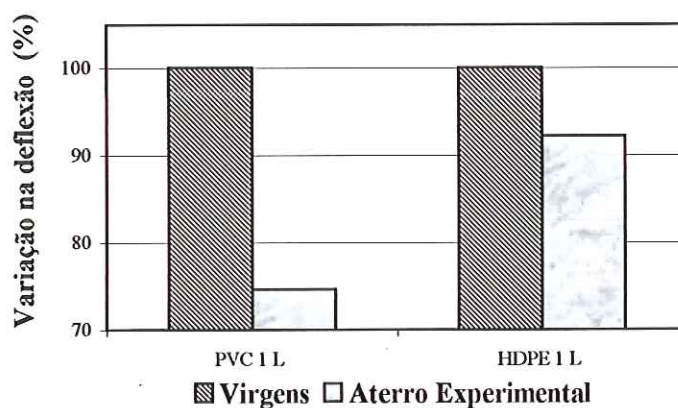


Figura 4.34. Deflexão na ruptura: amostras virgens comparadas às do aterro experimental.

A Figura 4.35 apresenta os gráficos resultantes dos ensaios de Análise Termogravimétrica – TGA- realizados na amostra de PVC do Aterro Experimental e a Tabela 4.9, uma síntese dos resultados desses ensaios.

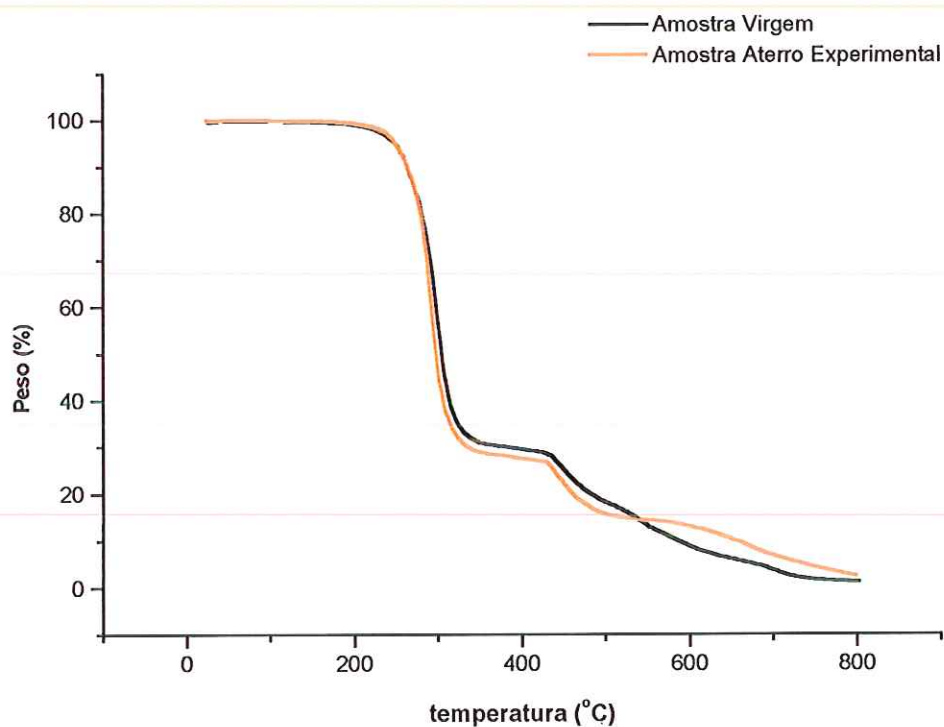


Figura 4.35. Ensaio de TGA. Amostra virgem e PVC comparada à amostra retirada do Aterro Experimental

TABELA 4.9. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras virgens e retirada do Aterro Experimental.

Parâmetros medidos	A (%)	Temperatura (°C)	B (%)	Temperatura (°C)	C (%)	Temperatura (°C)
Virgem	71,52	259,60	9,97	432,79	18,51	> 500 °C
Aterro Experimental	73,25	264,15	12,10	433,03	14,65	> 500 °C

(A)-degradação do plastificante e perda de HCl da cadeia do polímero, (B)-Polímero residual; (C)-resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e cinza.

Comparando os resultados do ensaio de TGA obtido para a amostra virgem e amostra retirada do Aterro Experimental, pode-se observar que a amostra retirada do aterro não apresentou variação significativa no primeiro processo de derretimento referente à temperatura de cerca de 260 °C. Isto significa que não há um indicativo de perda de plastificante da amostra retirada do aterro. Provavelmente, o primeiro processo de degradação em uma geomembrana de PVC corresponde à perda de plastificante. Então pequenas variações no parâmetro (A) podem indicar uma perda de plastificante mais significativa, se ainda não tiver ocorrido nenhum tipo de degradação na resina. Infelizmente a forma como o ensaio foi realizado não permitiu obter apenas a perda de plastificante e desta forma identificar pequenas perdas de plastificante.

Por outro lado, pode-se constatar através de análise tátil-visual e de acordo com os resultados obtidos nos ensaios mecânicos, que a amostra de PVC retirada do aterro apresentou-se ligeiramente enrijecida.

Quanto à amostra de HDPE, visualmente, pode-se constatar que, esta apresentava algumas ranhuras. Porém as variações encontradas nos ensaios mecânicos foram pouco significativas.

Como síntese das variações ocorridas entre as amostras virgens e as recuperadas do Aterro Experimental tem-se que:

- As variações nas propriedades físicas foram bem menos significativas que as encontradas nas propriedades mecânicas.
- Ensaio de tração: a amostra de PVC, com 1,0 mm de espessura, mostrou-se enrijecida, como retratado pelo aumento de resistência à tração, em cerca de 33% na direção longitudinal e 46% na transversal, diminuição de deformação, da ordem de 22 % na longitudinal e 26 % na transversal e aumento significativo no módulo de elasticidade, de aproximadamente 161 % na longitudinal e 220 % na

transversal. As amostras de HDPE não apresentaram variações significativas, podendo ser atribuídas ao próprio coeficiente de variação do ensaio.

- Ensaio de rasgo: a amostra de PVC apresentou resistência ao rasgo superior à da amostra virgem tomada como referência, da ordem de 55 %, nas duas direções ensaiadas. A amostra de HDPE não apresentou variação significativa.
- Ensaio de punção: a amostra de PVC apresentou resistência ao puncionamento superior à amostra virgem em aproximadamente 55 % e deflexão correspondente 25 % inferior. Já a amostra de HDPE não apresentou variação significativa.
- Os resultados encontrados no ensaio de TGA realizado nas amostras de PVC não permitiram identificar nenhuma perda de plastificante.

4.3 Comparação entre as amostras virgens e as amostras retiradas do sistema de impermeabilização do aterro sanitário classe I

A degradação ocorrida numa geomembrana de PVC de 1,0 mm de espessura amostrada de um aterro classe I, após 12 anos de seu encerramento, foi estudada comparando-se os resultados de ensaios com valores correspondentes encontrados em uma amostra virgem. Esta amostra virgem utilizada como referência, consta de uma amostra do material de mesma fabricação que a manta utilizada no aterro, mas de lote e idade diferentes, visto que não se dispunha de nenhum remanescente da amostra utilizada na época da construção.

Os ensaios físicos constaram das determinações de espessura, gramatura e densidade de acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.10.

TABELA 4.10. Resultados médios dos ensaios físicos realizados na amostra virgem e amostra retirada do Aterro classe I, após 12 anos de seu encerramento.

Ensaio	Espessura		Gramatura		Densidade	
	Valor médio (cm)		Valor médio (g/cm ²)		Valor médio	
PVC 1,0 mm virgem	1,027		0,136		1,303	
	CV (%)	1,57	CV (%)	0,68	CV (%)	0,14
PVC 1,0 mm Aterro classe I	0,919		0,116		1,267	
	CV (%)	0,44	CV (%)	0,44	CV (%)	0,56

A Tabelas 4.11 traz os resultados médios e os respectivos coeficientes de variação de cada parâmetro determinado nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados na amostra virgem e na amostra retirada do aterro após 12 anos.

TABELA 4.11. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados nas amostras de PVC virgem e retirada do aterro classe I após 12 anos de seu encerramento.

Ensaio	Tração						Rasgo		Punção			
Norma	ASTM D 638						ASTM D 1004		ASTM D 4833			
Amostra virgem												
Número de CP	3 CP cada direção						3 CP cada direção		2 CP			
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1,0 mm - Long	14,57	3,7	415,2	6,2	9,28	3,3	49,14	5,0	2,20	-	299,9	-
PVC 1,0 mm - Trans	13,47	3,4	365,3	8,6	10,03	5,1	58,26	4,3				
Amostra retirada do Aterro Classe I												
Número de CP	5 CP cada direção						10 CP cada direção		15 CP			
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1,0 mm - Long	13,52	2,6	417,1	5,7	8,51	2,9	49,41	5,4	2,5	5,1	355,1	4,0
PVC 1,0 mm - Trans	13,18	3,2	409,2	4,5	8,74	2,9	51,57	5,0				

Observar-se da Tabela que a amostra retirada do aterro apresentou espessura cerca de 11 % inferior a da amostra virgem, enquanto a densidade é cerca de 3 % inferior. Ressalta-se, novamente, que os dados provenientes da amostra virgem referem-se a uma amostra diferente da utilizada originalmente no aterro.

Com relação aos ensaios mecânicos tem-se que a geomembrana de PVC inserida no aterro apresentou resistência à tração inferior à da amostra virgem, da ordem de 7% na direção longitudinal e de 2 % na transversal. A deformação na ruptura foi superior, correspondendo a 1% na direção longitudinal e a 12 % na transversal. O módulo de

elasticidade apresentou valores inferiores ao da amostra virgem de aproximadamente 8 % na direção longitudinal e 13 % na transversal.

Pode-se também observar na Tabela 4.11 que a manta de PVC praticamente não apresentou variação de resistência ao rasgo na direção longitudinal e, na direção transversal, mostrou resistência ao rasgo inferior ao material virgem em aproximadamente 11 %.

Com relação aos resultados encontrados no ensaio de punção, pode-se observar que a manta de PVC mostrou resistência ao puncionamento da ordem de 18 % superior à amostra virgem, sendo a correspondente deflexão cerca de 13 % maior.

Foi realizado também o ensaio de TGA nas amostras virgem e retirada do aterro classe I. Os resultados encontrados no ensaio de TGA encontram-se na Figura 4.36 e na Tabela 4.12.

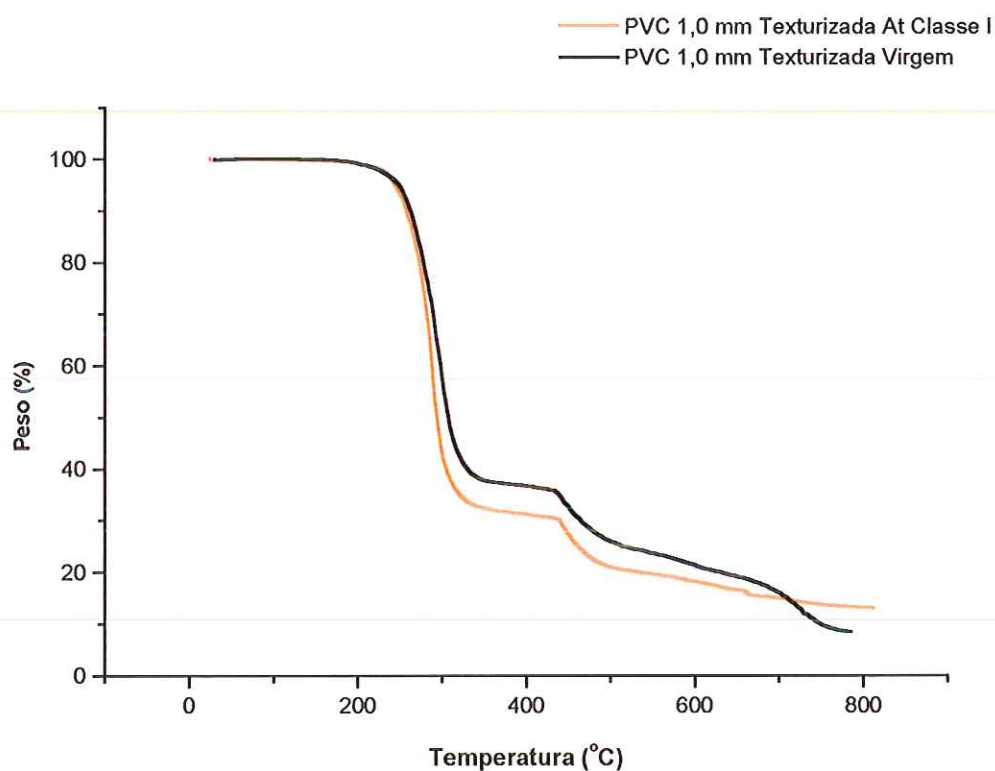


Figura 4.36. Ensaio de TGA. Amostras texturizadas de PVC de 1,0 mm virgem e retirada do Aterro Classe I.

TABELA 4.12. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras virgens e retirada do aterro classe I.

Parâmetros medidos	A (%)	Temperatura (°C)	B (%)	Temperatura (°C)	C (%)	Temperatura (°C)
Virgem	64,54	260,16	17,06	435,52	16,49	> 500 °C
Aterro Classe I	70,00	259,69	10,40	441,39	19,6	> 500 °C

(A)-degradação do plastificante e perda de HCl da cadeia do polímero, (B)-Polímero residual; (C)-resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e cinza.

Os resultados obtidos no ensaio de TGA demonstraram que a amostra retirada do aterro apresentou um comportamento semelhante à amostra de referência, principalmente no primeiro processo de derretimento, que indica a perda de plastificante da amostra. Isto significa que não pôde ser identificada nenhuma perda de plastificante na amostra retirada do aterro.

De acordo com análise visual, também pôde-se observar que a amostra retirada do aterro estava bastante flexível, sem apresentar sinal visual de degradação ou quaisquer outros sinais que pudessem sugerir perda de plastificante ou outro tipo de aditivo. As variações encontradas nos ensaios físicos e mecânicos, em relação aos resultados da amostra virgem tomados como referência, podem ser creditadas ao próprio coeficiente de variação dos ensaios, bem como as diferenças na fabricação (as amostras foram fabricadas em épocas diferentes). Apenas para retratar as pequenas variações observadas pode-se dizer que:

- A amostra do aterro apresentou espessura ligeiramente inferior ao valor nominal de 1,0 mm e densidade ligeiramente inferior a da amostra virgem;
- Ensaio de tração: a amostra do aterro apresentou um comportamento mais dúctil, evidenciado por um menor módulo de elasticidade, cerca de 10%, em média, inferior ao da amostra virgem;
- Ensaio de rasgo e punção: ao contrário dos resultados encontrados no ensaio de tração a amostra apresentou um ligeiro aumento de resistência ao rasgo e ao puncionamento, quando comparado à amostra virgem;
- Não foi possível identificar nenhuma perda de plastificante através dos resultados obtidos no ensaio de TGA.

4.4. Comparação entre as amostras virgens e as amostras expostas à temperatura

Para avaliar a influência da temperatura no comportamento físico das geomembranas, mediram-se o peso e a espessura das amostras antes de serem levadas à

estufa a 75 °C e após 1, 3 e 9 meses. Os valores médios obtidos são os constantes da Tabela 4.13 e as Figuras 4.37 e 4.38, apresentam a taxa de variação no peso e espessura provocados pela exposição à temperatura em função do tempo.

TABELA 4.13. Resultados médios de espessura e peso, em amostras de PVC e HDPE de diferentes espessuras antes, após 1, 3 e 9 meses de exposição à temperatura de 75°C.

Geomembranas		Peso (g)	Espessura média (cm)
PVC 1 mm Lote I	Antes de 1 mês	181,79	0,966
	Após 1 mês	180,88	0,956
	Antes de 3 meses	180,73	0,968
	Após 3 meses	179,53	0,973
	Antes de 9 meses	177,13	0,972
	Após 9 meses	174,72	0,953
PVC 2 mm Lote I	Antes de 1 mês	370,22	2,057
	Após 1 mês	367,65	2,060
	Antes de 3 meses	366,32	2,047
	Após 3 meses	362,96	2,004
	Antes de 9 meses	385,69	2,055
	Após 9 meses	378,77	2,058
HDPE 1 mm Fornecedor “A”	Antes de 1 mês	133,93	0,964
	Após 1 mês	133,86	0,980
	Antes de 3 meses	142,53	1,016
	Após 3 meses	142,89	1,034
	Antes de 9 meses	136,54	0,987
	Após 9 meses	136,98	0,948
HDPE 1,5 mm Fornecedor “A”	Antes de 1 mês	208,47	1,454
	Após 1 mês	208,22	1,482
	Antes de 3 meses	205,08	1,488
	Após 3 meses	205,35	1,513
	Antes de 9 meses	229,15	1,478
	Após 9 meses	229,73	1,493

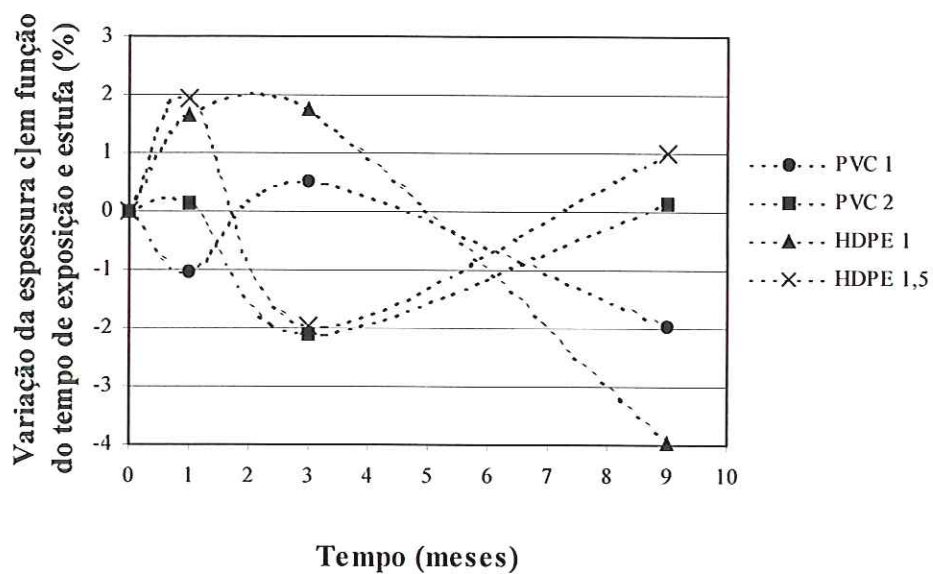


Figura 4.37. Variação da espessura em função do tempo de exposição em estufa à temperatura de 75 °C.

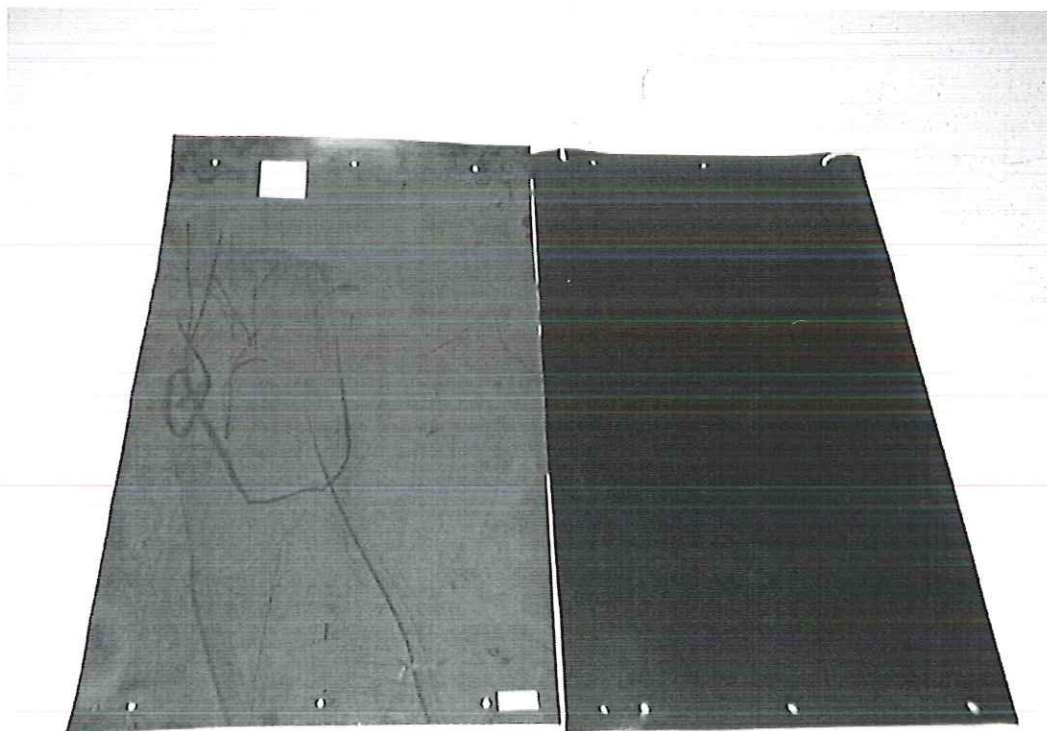


Figura 4.38. Geomembrana de HDPE comparada à amostra de PVC ambas retiradas da estufa após 9 meses de exposição à temperatura de 75 °C.

A Tabela 4.14 sintetiza os resultados dos ensaios mecânicos realizados após exposição em estufa.

TABELA 4.14. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras de PVC e HDPE retiradas da estufa a 75 °C após 3 períodos de exposição.

Ensaio	Tração						Rasgo		Punção			
Norma	ASTM D 638						ASTM D 1004		ASTM D 4833			
Número de CP	3 CP cada direção						3 CP cada direção		2 CP			
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{máx}$	CV	Defl.	CV	$F_{máx}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1 mm-Long -1 mês	16,01	1,7	522,6	2,8	4,80	2,4	45,66	9,8	2,70	0,1	279,8	1,2
PVC 1 mm-Trans -1 mês	13,75	3,5	506,0	4,4	4,41	0,8	52,30	6,8				
PVC 1 mm-Long -3 meses	15,34	1,1	537,5	1,2	4,72	0,4	42,14	5,0	2,43	0,8	244,6	1,3
PVC 1 mm-Trans -3 meses	13,15	2,5	503,1	4,1	4,55	1,8	48,46	15,5				
PVC 1 mm-Long -9 meses	15,13	0,9	496,2	1,3	4,96	2,2	43,56	9,2	2,52	0,6	278,7	0,1
PVC 1 mm-Trans -9 meses	13,36	3,0	492,2	1,6	5,27	3,2	45,52	6,2				
PVC 2 mm-Long -1 meses	17,63	1,9	511,0	1,2	5,34	3,6	103,9	4,6	2,51	1,2	575,6	2,2
PVC 2 mm-Trans -1 mês	15,60	2,0	508,7	4,7	5,04	1,0	104,8	4,2				
PVC 2 mm-Long -3 mês	15,38	2,1	506,2	3,6	5,16	2,2	111,8	7,5	2,50	1,9	532,8	1,8
PVC 2 mm-Trans -3 meses	14,30	4,2	508,4	5,3	5,34	2,5	101,5	8,1				
PVC 2 mm-Long -9 mês	16,43	2,8	473,9	3,8	5,97	3,1	100,2	1,0	2,44	1,4	582,0	1,9
PVC 2 mm-Trans -9 mês	15,67	1,0	494,1	1,0	5,51	3,0	96,35	2,1				
HDPE 1 mm-Long -1 mês	11,33	9,7	23,23	2,29	140,4	17,9	112,6	2,3	2,38	16,1	368,7	5,2
HDPE 1 mm-Trans -1 mês	12,69	1,0	20,46	4,70	178,6	11,3	121,8	4,3				
HDPE 1 mm-Long -3 meses	10,55	11,2	21,69	5,63	206,7	10,5	139,3	13,5	1,83	1,2	315,4	0,9
HDPE 1 mm-Trans -3 meses	11,77	4,7	17,85	1,49	244,0	4,6	127,0	1,4				
HDPE 1 mm-Long -9 meses	11,33	10,8	22,62	2,04	212,0	13,2	113,2	2,1	1,85	5,9	321,1	1,1
HDPE 1 mm-Trans -9 meses	9,38	6,5	17,23	5,58	211,3	8,1	105,2	4,1				
HDPE 1,5 mm-Long -1 mês	13,45	0,5	23,85	5,56	149,1	14,8	158,1	2,5	1,53	0,9	448,4	0,2
HDPE 1,5 mm-Trans -1 mês	12,69	2,3	19,85	4,03	188,2	0,8	179,8	2,9				
HDPE 1,5 mm-Long -3 meses	12,29	4,3	21,23	2,17	187,9	10,4	159,3	4,8	1,51	1,4	448,6	1,0
HDPE 1,5 mm-Trans -3 meses	12,33	5,9	18,31	1,46	201,8	11,9	173,0	9,6				
HDPE 1,5 mm-Long -9 meses	12,43	9,0	20,92	1,27	230,0	10,2	153,4	2,2	1,50	0,6	476,7	0,8
HDPE 1,5 mm-Trans -9 meses	11,31	12,0	17,38	5,53	254,2	3,0	175,9	6,5				

Avaliou-se a porcentagem de variação nas propriedades mecânicas das amostras submetidas à elevada temperatura em relação ao material original *versus* o tempo. As amostras virgens de PVC são referentes ao Lote I, e as de HDPE às amostras fornecidas pelo fabricante “A”. As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 apresentam as variações dos parâmetros encontrados nos ensaios de tração. De acordo com a Figura 4.39 pode-se perceber que as geomembranas de PVC de 2,0 mm apresentaram um aumento de resistência à tração da ordem de 7%, após 1 mês de incubação, seguido de diminuição após 3 meses, voltando a aumentar após 9 meses, quando atingiram valores próximos aos iniciais na longitudinal. Na direção transversal ocorreu um aumento da ordem de 7%. As mantas de PVC de 1,0 mm apresentaram diminuição durante todo o tempo de incubação, ocorrendo uma redução na resistência de, aproximadamente, 6 % após 9 meses. As geomembranas de HDPE apresentaram tendência de diminuição de resistência durante todo o período de exposição, com valores mais significativos na direção transversal, atingindo, a amostra de 1,0 mm, redução da ordem de 24%, e a de 1,5 mm 17 %, após 9 meses.

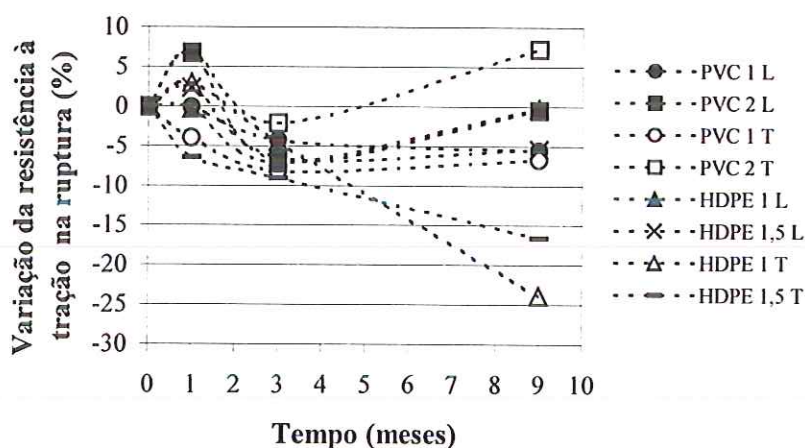


Figura 4.39. Variação da resistência à tração na ruptura com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.

A Figura 4.40 apresenta as variações da deformação na ruptura provocada pelo aumento de temperatura. Pode-se observar que as amostras de PVC apresentaram uma pequena variação na deformação, durante todo período de exposição, com variação mais significativa para o PVC de 1,0 mm na direção transversal, que apresentou redução de aproximadamente 8%. Já as amostras de HDPE apresentaram aumento de deformação com um mês, com valores mais significativos para a amostra de 1,5 mm na direção longitudinal (34%), seguido

de decréscimo com 3 e 9 meses, mas ainda mantendo aumento de deformação superior a 7% para todas as amostras.

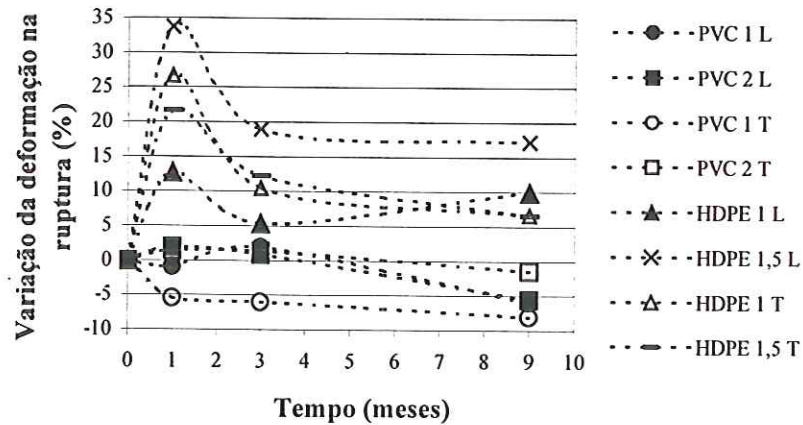


Figura 4.40. Variação da deformação na ruptura com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.

Na análise do módulo de elasticidade, constatou-se, de acordo com a Figura 4.41, que as geomembranas de PVC apresentaram tendência de redução no módulo de elasticidade com 1 mês, apresentando aumento após 3 meses, retornando a valores próximos aos iniciais após 9 meses. Porém estas variações foram mais significativas para a manta de 1,0 mm, com redução da ordem de 20% no primeiro mês, mantendo-se este valor praticamente constante nos meses seguintes.

A geomembrana de HDPE de 1,0 mm apresentou diminuição do módulo da ordem de 20% após 1 mês, apresentando aumento de aproximadamente 14% após 3 meses. Ocorreu ainda um aumento de 17% na direção longitudinal e decréscimo a valor próximo ao inicial na direção transversal. A manta de 1,5 mm também apresentou diminuição com um mês, seguido de aumento nos dois próximos períodos de amostragem, com valores mais significativos para amostra de 1,5 mm na direção longitudinal, que apresentou redução de aproximadamente 40%, após 1 mês de exposição, e valor próximo ao inicial após 9 meses.

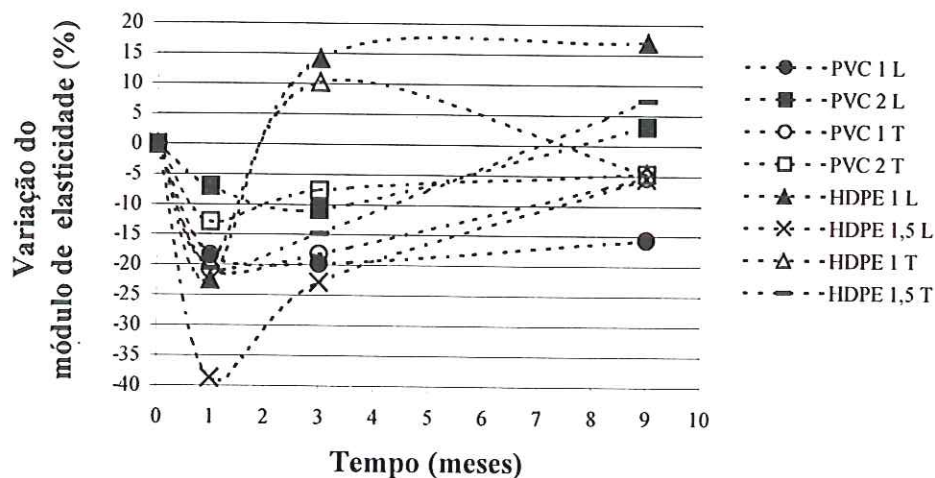


Figura 4.41. Variação do módulo de elasticidade com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.

A Figura 4.42 apresenta as variações encontradas nos ensaios de rasgo. Tem-se que a geomembrana de PVC de 1,0 mm apresentou aumento na resistência ao rasgo de aproximadamente 4% na direção longitudinal e de 8 % na direção transversal após 1 mês, seguido de diminuição após 3 e 9 meses. Estes valores ficaram próximos aos iniciais na direção longitudinal, ocorrendo redução da ordem de 6% na direção transversal no fim da exposição. A amostra de 2,0 mm apresentou aumento na direção longitudinal da ordem 9% com um mês, e 18% com 3 meses. Estes valores reduziram-se após 9 meses, mas ainda permaneceu um aumento da ordem de 5%. Na direção transversal as variações foram menos significativas com os valores ficando próximos aos iniciais após 9 meses de exposição.

A amostra de HDPE de 1,0 mm apresentou aumento da ordem de 2% nas duas direções ensaiadas após um mês. Após 3 meses estes valores atingiram um aumento de aproximadamente 27% na longitudinal e apenas 7% na transversal. Após 9 meses, a resistência ao rasgo diminuiu consideravelmente, atingindo valores próximos aos iniciais na longitudinal, e redução de cerca de 12 % na transversal. A manta de 1,5 mm apresentou redução durante todo o período de exposição, atingindo variações da ordem de 14 % na longitudinal e 5 % na direção transversal, após 9 meses.

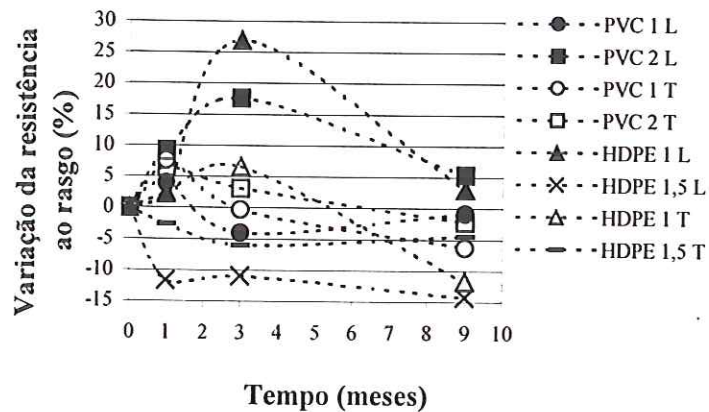


Figura 4.42. Variação da resistência ao rasgo com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.

As Figuras 4.43 e 4.44 apresentam os resultados encontrados nos ensaios de punção. De acordo com a Figura 4.43, as amostras de PVC apresentaram tendência de aumento de resistência com um mês, seguido de diminuição com 3 meses, voltando a aumentar após 9 meses de exposição. Estas variações foram mais evidenciadas para a amostra de 2,0 mm, que apresentou aumento de resistência ao puncionamento de, aproximadamente, 21% após 9 meses.

A geomembrana de HDPE de 1,0 mm apresentou aumento com 1 mês (7%), seguido de diminuição da ordem de 8 %, após 3 meses, mantendo esta redução após 9 meses de exposição. Já a manta de 1,5 mm apresentou aumento de resistência durante todo o período, atingindo um aumento de aproximadamente 11 %, após 9 meses.

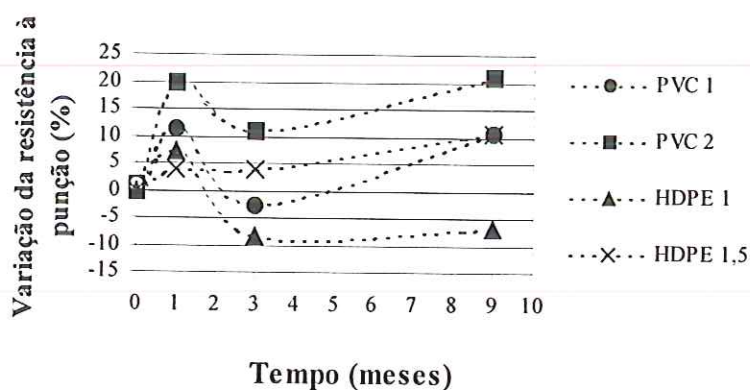


Figura 4.43. Variação da resistência ao puncionamento com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.

Quanto à variação de deflexão no puncionamento, tem-se de acordo com a Figura 4.44, que a manta de PVC de 2,0 mm apresentou um aumento de aproximadamente 10% durante todo o período de exposição. A manta de PVC de 1,0 mm apresentou aumento de deflexão com um mês, da ordem de 17%, seguido de diminuição após 3 meses, mantendo, contudo, aumento de aproximadamente 10% após 9 meses. O polietileno apresentou diminuição de deflexão nos três períodos ensaiados. Estes valores foram mais evidenciados para a manta de 1,0 mm, que sofreu reduções da ordem de 25% após 9 meses.

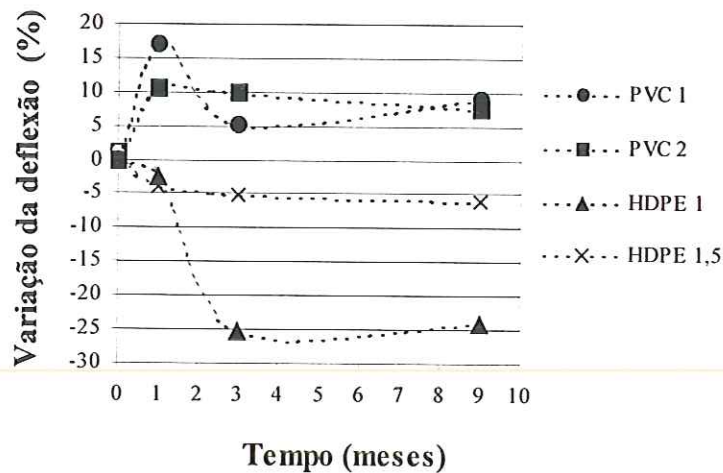


Figura 4.44. Variação da deflexão na ruptura com o tempo de exposição a 75 °C em estufa.

Verifica-se que para o PVC o efeito da temperatura parece depender da espessura, ou seja, a menor espessura (1,0 mm) foi a mais afetada. Porém para as amostras de HDPE ocorreu o contrário em muitos parâmetros analisados, encontrando-se variações mais significativas para a amostra mais espessa. Como as amostras virgens de HDPE de 1,5 mm fornecidas pelo fabricante “A” apresentavam muitas ranhuras, cogitou-se que isto poderia ter afetado os resultados encontrados. Com o objetivo de verificar tal possibilidade, amostras de HDPE de 1,0 e 1,5 mm, fornecidas pelo fabricante “B”, foram levadas à estufa por 3 meses. As Figuras 4.45, 4.46 e 4.7 apresentam os resultados encontrados no ensaio de tração.

Pode-se constatar de acordo com a Figura 4.45, que as amostras de HDPE apresentaram redução de resistência à tração, com valores mais significativos para a amostra de 1,0 mm na direção longitudinal (da ordem de 12 %) e amostra de 1,5 mm na transversal (da ordem de 13 %).

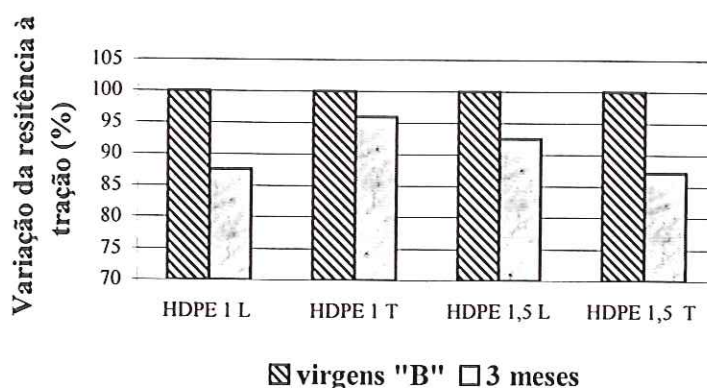


Figura 4.45. Variação da resistência à tração: amostras virgens do fabricante “B” comparadas às retiradas da estufa a 75 °C após 3 meses

Na análise da variação da deformação na ruptura, pode-se observar, de acordo com a Figura 4.46 que, as amostras apresentaram aumento de deformação e que os valores mais significativos também ocorreram para as amostras de HDPE de 1,5 mm, com aumentos da ordem de 21 % na longitudinal e 16 % na direção transversal. A amostra de 1,0 mm apresentou aumento em cerca 10 % na longitudinal e em cerca de apenas 2 % na transversal

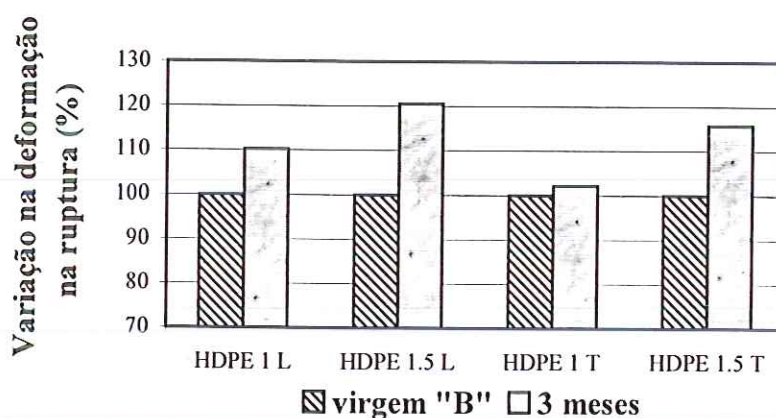


Figura 4.46. Variação da deformação na ruptura: amostras virgens do fabricante “B” comparadas às retiradas da estufa a 75 °C após 3 meses.

O mesmo pôde ser observado nas variações no módulo de elasticidade apresentados na Figura 4.47. As amostras de polietileno do fornecedor “B” apresentaram redução no módulo, nas duas espessuras ensaiadas, mas os valores mais significativos foram para a amostra mais espessa, de aproximadamente 20 % nas duas direções ensaiadas, enquanto a amostra de 1,0 mm apresentou reduções inferiores à 4 %.

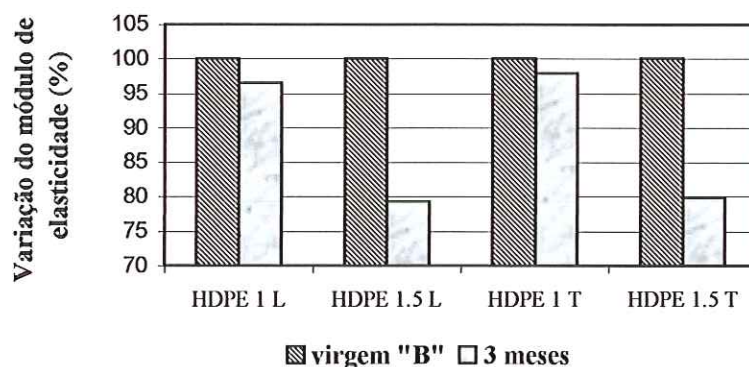


Figura 4.47. Variação no módulo de elasticidade: amostras virgens do fornecedor “B” comparadas às retiradas da estufa a 75 °C após 3 meses.

Conclui-se que as variações encontradas nos parâmetros obtidos no ensaio de tração, realizado após 3 meses de exposição à temperatura de 75 °C nas amostras do fabricante “B”, também foram mais pronunciadas para amostra de 1,5 mm, o que confirma os resultados obtidos nas amostras do fabricante “A”.

As Figuras 4.48 a 4.50 apresentam os gráficos obtidos nos ensaios de TGA, realizados nas amostras de PVC retiradas da estufa após 9 meses, e nos ensaios de DSC realizados nas amostras de HDPE, após 3 e 9 meses, para as amostras do fornecedor “A”, e após 3 meses, para as amostras do fornecedor “B”. As Tabelas 4.15 e 4.16 trazem uma síntese desses resultados.

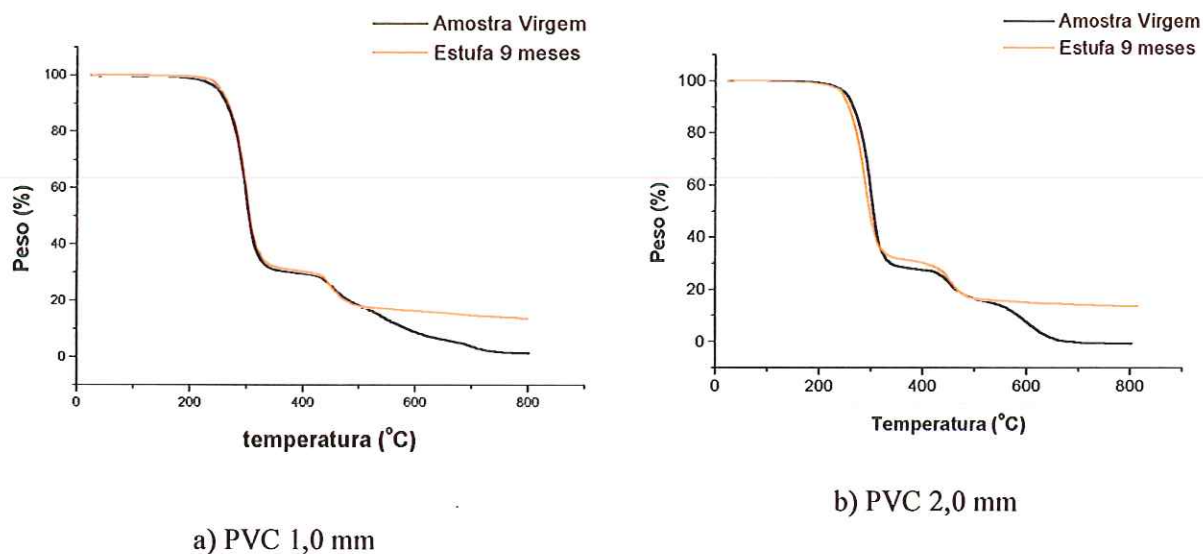


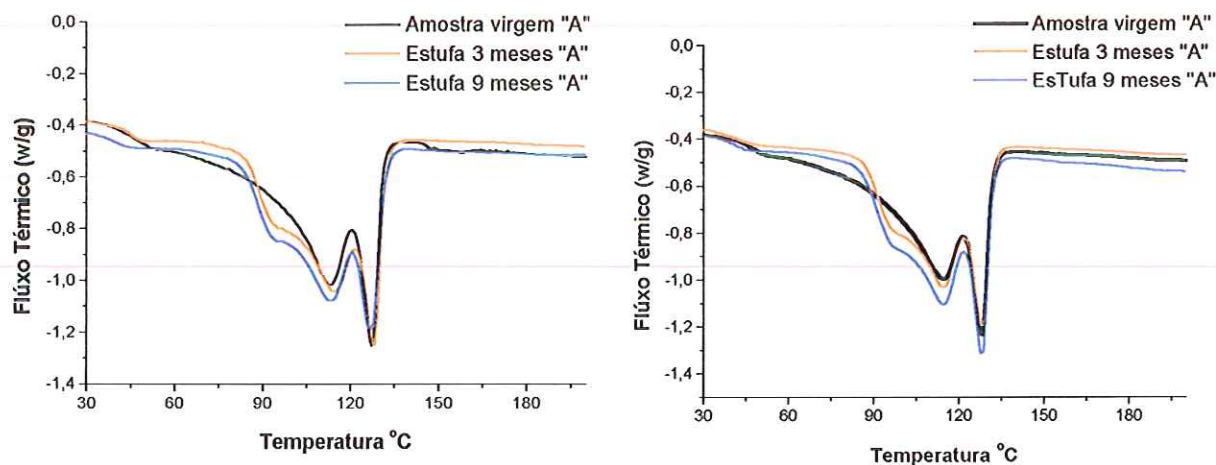
Figura 4.48. Amostras de PVC de 1,0 e 2,0 mm retiradas da estufa após 9 meses comparadas às amostras virgens.

TABELA 4.15. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras de PVC virgens e retiradas da estufa após 9 meses de exposição.

Parâmetros medidos	A (%)	Temperatura (°C)	B (%)	Temperatura (°C)	C (%)	Temperatura (°C)
PVC 1,0 mm						
Virgem	71,52	259,60	9,97	432,79	18,51	> 500 °C
Estufa 9 meses	71,16	264,59	10,73	434,86	18,11	> 500 °C
PVC 2,0 mm						
Virgem	73,05	267,89	13,68	432,66	13,29	> 500 °C
Estufa 9 meses	71,76	266,85	12,80	434,86	15,44	> 500 °C

(A)-degradação do plastificante e perda de HCl da cadeia do polímero, (B)-Polímero residual; (C)-resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e cinza.

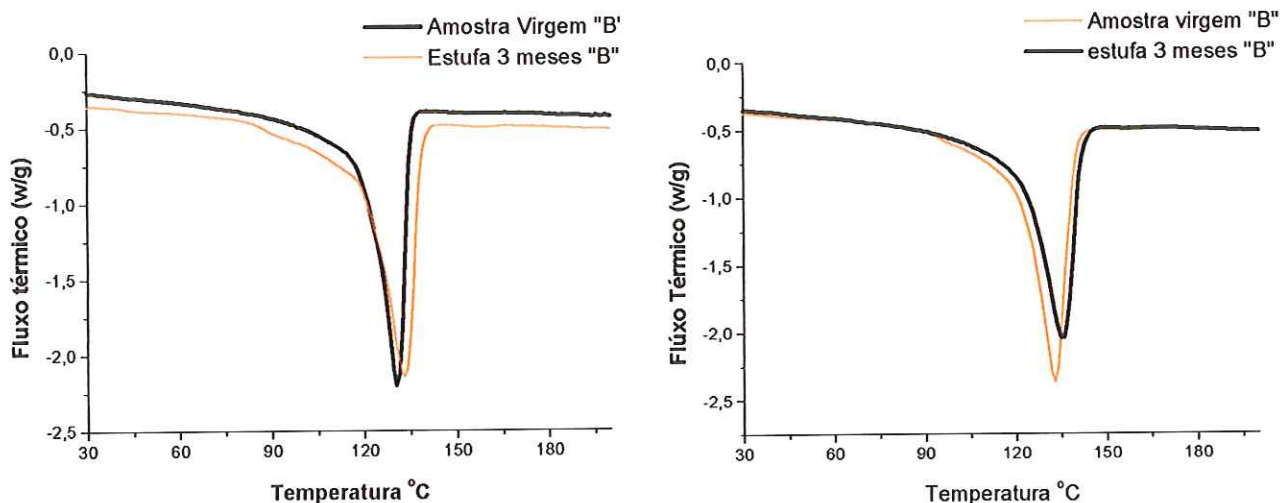
Tem-se, de acordo com a Figura 4.48 (a) e (b), que as amostras de PVC expostas à temperatura não apresentaram perda significativa de plastificante. A amostra de 1,0 mm apresentou um comportamento bem similar ao da amostra virgem. Para a amostra de 2,0 mm pode-se perceber uma ligeira variação no parâmetro (A), da ordem de 2 %, quando comparada a amostra intacta.



a) HDPE de 1,0 mm - fornecedor "A"

b) HDPE de 1,5 mm - fornecedor "A"

Figura 4.49. Amostras de HDPE de 1,0 e 1,5 mm do fornecedor "A" retiradas da estufa após 3 e 9 meses comparadas às amostras virgens.



a) HDPE de 1,0 mm - fornecedor "B"

b) HDPE de 1,5 mm - fornecedor "B"

Figura 4.50. Amostras de HDPE de 1,0 e 1,5 mm do fornecedor "B" retiradas da estufa após 3 meses comparadas às amostras virgens.

TABELA 4.16. Resultados obtidos no ensaio de DSC, realizado nas amostras de HDPE dos fornecedores "A" e "B" antes e após exposição à temperatura.

Parâmetros medidos	Temperatura de fusão (°C)		calor de fusão (ΔH) (J/g)	% de cristalinidade
HDPE de 1,0 mm - fornecedor "A"				
Amostra virgem	113,75	127,30	133,7	46,9
Amostra Temperatura 3 meses	114,50	128,12	134,7	47,3
Amostra Temperatura 9 meses	113,48	126,96	133,9	47,0
HDPE de 1,5 mm - fornecedor "A"				
Amostra virgem	114,20	128,20	127,1	44,6
Amostra Temperatura 3 meses	114,84	128,21	133,8	46,9
Amostra Temperatura 9 meses	114,51	127,95	138,8	48,7
HDPE de 1,0 mm - fornecedor "B"				
Amostra virgem	130,33		125,7	44,1
Amostra Temperatura 3 meses	132,92		155,2	54,5
HDPE de 1,5 mm - fornecedor "B"				
Amostra virgem	135,30		144,4	50,7
Amostra Temperatura 3 meses	132,69		162,6	57,1

Pôde-se observar, de acordo com os resultados obtidos no ensaio de DSC que, todas as amostras de HDPE ensaiadas apresentaram aumento de cristalinidade, em função do

tempo de exposição à temperatura de 75 °C. As geomembranas do fornecedor “A” apresentaram aumentos que atingiram até 9% na membrana de 1,5mm, após 9 meses de exposição. Nesta membrana, após três meses esse aumento foi da ordem de 5%, ou seja, parece haver um aumento continuado da cristalização com o tempo de exposição. Esse fato é menos pronunciado na membrana de 1,0 mm que praticamente não sofreu nenhum aumento de cristalinidade.

As amostras do fornecedor “B” apresentaram variações mais significativas, retratadas por aumento de cerca de 23 % para amostra de 1,0 mm e de 12 % para a amostra de 1,5 mm após 3 meses de exposição.

As temperaturas de fusão não apresentaram variações significativas para duas espessuras ensaiadas para as amostras dos dois fornecedores.

Segundo a norma ASTM D 794 – Determinação de variação permanente nas propriedades de materiais plásticos devido à exposição ao calor – os materiais plásticos expostos ao calor podem estar sujeitos a algum tipo de mudança nas propriedades físicas, mecânicas e químicas, porém o tempo e a temperatura de exposição é que vão determinar a extensão e o tipo de variações impostas. Assim, deve-se considerar que um material plástico não é necessariamente degradado devido à exposição à temperatura elevada, podendo permanecer inalterado ou até mesmo ser melhorado.

Geralmente, pequenas exposições à temperatura causam a perda de materiais voláteis da composição da geomembrana, como umidade, solventes, ou plastificantes, além de alguma alteração na cor.

Nas amostras ensaiadas, pôde-se constatar, visualmente, que as de HDPE do fabricante “A” apresentaram variação de cor, apresentando, superficialmente, uma camada branca similar a um talco, que pôde ser observada desde a primeira amostragem, após um mês de exposição, e que se tornou mais pronunciada nos períodos seguintes. As amostras de HDPE do fornecedor “B” não apresentaram nenhum sinal visual de degradação.

As amostras de PVC não apresentaram variação de cor em nenhum período de amostragem, apresentaram-se um pouco amolecidas no momento da retirada da estufa, mas recuperaram a consistência natural após resfriamento.

Já períodos extensos de exposição costumam causar alguma degradação retratada por progressivas mudanças nas propriedades das geomembranas. O grau das variações observado vai depender da propriedade medida. As propriedades mecânicas, por exemplo, podem não variar na mesma taxa, ou seja, o efeito da exposição pode ser bastante variado, especialmente quando a amostra é exposta por um longo período de tempo (ASTM – D794). Isto está de acordo com a dispersão apresentada pelos resultados obtidos nos ensaios

mecânicos, pois não se pôde observar nenhuma tendência de comportamento em função do tempo de exposição à temperatura.

As amostras de PVC apresentaram variações menos significativas que as amostras de HDPE, e estas pequenas variações se mostraram em função da espessura para a maioria dos parâmetros analisados. A amostra mais espessa mostrou-se menos influenciada pelo efeito da temperatura. Já as amostras de HDPE apresentaram variações mais significativas para a amostra mais espessa. Estas variações foram confirmadas através de ensaios adicionais em amostras fornecidas pelo fabricante “B” em exposição à temperatura elevada, em mesmas condições, durante 3 meses.

Quanto à análise química, tem-se que os resultados obtidos no ensaio de TGA realizado nas amostras de PVC, não demonstraram perdas significativas de plastificante após 9 meses de exposição. No ensaio de DSC, realizado nas amostras de HDPE, percebeu uma tendência de recristalização em função do tempo de exposição, para todas as amostras ensaiadas.

Para retratar as variações encontradas por exposição à temperatura de 75 °C tem-se que:

Ensaio físico: as amostras não apresentaram variações significativas de peso e espessura podendo ser atribuídos aos próprios coeficientes de variação dos ensaios.

Ensaio mecânico:

Ensaio de tração:

- Resistência à tração: as amostras de PVC apresentaram variações máximas da ordem de 7 % para as duas espessuras ensaiadas, durante todo o período de exposição. Já as amostras de HDPE do fabricante “A” apresentaram variações mais significativas após 9 meses, apresentando redução na resistência à tração de cerca de 24 % para a amostra de 1,0 mm e 17 % para a amostra de 1,5 mm na direção transversal. As amostras de HDPE do fabricante “B”, ensaiadas após 3 meses de exposição, apresentaram redução de resistência com valores mais significativos na direção longitudinal, da ordem de 12% para a amostra de 1,0 mm e 13 % para a amostra de 1,5 mm.
- Deformação na ruptura: as amostras de PVC apresentaram redução máxima da ordem de 8 % após 9 meses para a amostra de 1,0 mm. Já as amostras de HDPE do fornecedor “A” apresentaram tendência de aumento de resistência com 1 mês seguido de diminuição após 3 meses, mantendo-se praticamente constante até 9 meses. Estes valores foram mais significativos para a amostra de 1,5 mm na direção longitudinal que apresentou aumento de deformação da ordem de 35 % após 1 mês e da ordem 18 % após 3 e 9 meses. As

amostras de HDPE do fornecedor “B” também apresentaram aumento de deformação após 3 meses. A amostra de 1,5 mm apresentou um maior aumento de deformação em cerca de 21 % na direção longitudinal.

- Módulo de elasticidade: as amostras de PVC apresentaram tendência de diminuição com 1 mês, seguido de aumento com 3 meses e atingindo valores próximos aos da amostra virgem após 9 meses, exceto para a amostra de 1,0 mm que manteve redução da ordem de 15 %. As amostras de HDPE do fabricante “A” apresentaram variações mais significativas, apresentando redução com um mês (da ordem de 40 % para a amostra mais espessa na longitudinal) seguido de aumento com 3 e 9 meses. As amostras de HDPE de 1,0 mm do fornecedor “B” não apresentaram variações significativas no módulo de elasticidade após 3 meses de exposição. Porém a amostra mais espessa apresentou redução da ordem de 20 % nas duas direções ensaiadas.

Ensaio de rasgo: as amostras de PVC não apresentaram variações significativas de resistência ao rasgo durante todo o período de exposição, exceto a amostra de 2,0 mm que apresentou aumento nos dois primeiros períodos de amostragem (aumento da ordem de 18 % após 3 meses) atingindo valores próximos aos iniciais após 9 meses. O HDPE (fornecedor “A”) de 1,0 mm apresentou aumento de resistência com 1 e 3 meses (atingindo aumento de cerca de 27 % na direção longitudinal após 3 meses) seguido de diminuição após 9 meses de exposição. A amostra de 1,5 mm apresentou redução de resistência ao rasgo durante todo o período de exposição, mostrando redução da ordem de 15 % para amostra de 1,5 mm na direção longitudinal após 9 meses.

Ensaio de punção:

- Resistência ao puncionamento: as amostras de PVC apresentaram aumento de resistência com 1 mês seguido de diminuição com 3 meses voltando a aumentar com 9 meses, com variações mais significativas para a amostra de 2,0mm que apresentou aumento de cerca de 21 % após 9 meses. As amostras de HDPE (fornecedor “A”) apresentaram um ligeiro aumento de resistência com 1 mês, porém, nos períodos seguintes, a amostra de 1,5 mm apresentou aumento de resistência (da ordem de 10 % após 9 meses) e a amostra de 1,0 mm apresentou redução, da ordem de 10 após 9 meses.
- Deflexão correspondente: as amostras de PVC apresentaram aumento de deflexão para as duas espessuras ensaiadas e o HDPE (fornecedor “A”) apresentou redução com variação mais significativa para a amostra de 1,0 mm que apresentou redução

de aproximadamente 25 após 3 meses mantendo praticamente constante até o fim da exposição.

Ensaio térmicos:

- Ensaio de TGA: não foi observada variação no parâmetro (A) para a amostra de PVC de 1,0 mm. A amostra de 2,0 mm apresentou um ligeiro decréscimo, da ordem de 2 %.
- Ensaio de DSC: as amostras de HDPE apresentaram tendência de aumento de cristalinidade em função do tempo de exposição à temperatura nas duas espessuras ensaiadas, tanto para as amostras do fabricante “A”, como as do fabricante “B”.

4.5. Comparação entre as amostras virgens e as amostras imersas em óleo diesel e gasolina

Para avaliar a influência do diesel e da gasolina nas características físicas das geomembranas de PVC (Lote II) e HDPE (Fornecedor “B”), mediram-se o peso e a espessura média das amostras antes e após imersão por um período de 6 meses. Estes valores são os constantes da Tabela 4.17.

Na análise da influência da gasolina, pôde-se perceber visualmente que as amostras de PVC estavam bastante enrijecidas e que sofreram redução de tamanho, o que foi evidenciado pela deformação dos orifícios utilizados para amarrar as amostras nas grades como está demonstrado na Figura 4.51. A amostra de 2,0 mm apresentou muitas bolhas, o que também pode ser observado na Figura 4.51, impossibilitando a realização dos ensaios propostos. Esta ocorrência de bolhas, possivelmente, se justifica pela penetração da gasolina entre as lâminas que compõem as geomembranas de PVC mais espessas. O mesmo não pôde ser observado para a manta de 1,0 mm de espessura, talvez por esta ser fabricada em uma única laminação.

As amostras de HDPE não apresentaram bolhas e nenhum sinal tátil-visual de degradação, apenas um ligeiro aumento de espessura da ordem de 1%, o que pode ser atribuído ao próprio coeficiente de variação do ensaio ou a uma eventual absorção de gasolina. A amostra de PVC de 1,0 mm apresentou variação significativa de espessura, com redução da ordem de 11%, segundo ilustrado na Figura 4.52.

Na análise da influência do óleo diesel, não foi observado nenhuma presença de bolhas, nem nas amostras de PVC nem nas de HDPE. Pôde-se observar, através de avaliação tátil-visual, que a manta de PVC de 1,0 mm estava bastante enrijecida. A amostra de PVC de 2,0 mm e as de HDPE não apresentaram nenhum sinal de degradação tátil-visual.

TABELA 4.17. Resultados médios de espessura e peso, em amostras de PVC (Lote II) e HDPE (Fornecedor “B”) antes e após imersão em gasolina e óleo diesel por 6 meses.

Geomembranas		Peso (g)	Espessura média (cm)
PVC 1 mm Gasolina	Antes da imersão	65,55	0,988
	Após a imersão	48,10	0,880
PVC 2 mm Gasolina	Antes da imersão	131,41	*
	Após a imersão	99,43	*
HDPE 1 mm Gasolina	Antes da imersão	52,09	1,049
	Após a imersão	53,10	1,066
HDPE 1,5 mm Gasolina	Antes da imersão	76,79	1,548
	Após a imersão	78,93	1,562
PVC 1 mm Óleo diesel	Antes da imersão	65,66	0,983
	Após a imersão	55,72	0,925
PVC 2 mm Óleo diesel	Antes da imersão	132,46	2,035
	Após a imersão	123,53	2,038
HDPE 1 mm Óleo diesel	Antes da imersão	53,46	1,094
	Após a imersão	56,58	1,119
HDPE 1,5 mm Óleo diesel	Antes da imersão	75,03	1,500
	Após a imersão	79,95	1,534

* valores não determinados.

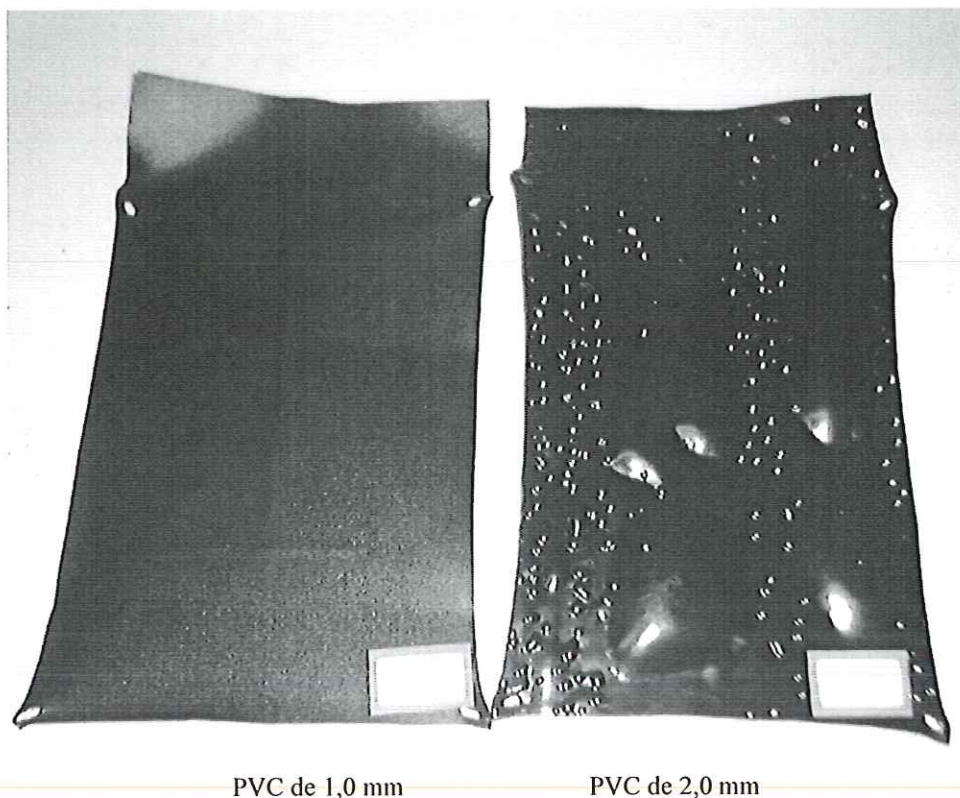


Figura 4.51. Amostras de PVC após 8 meses de imersão em gasolina.

De acordo com a Figura 4.52, tem-se que a amostra de PVC de 1,0 mm apresentou-se mais sensível à presença de óleo diesel, com redução de espessura de aproximadamente 6%, enquanto a amostra de 2,0 mm não apresentou variação significativa. As amostras de HDPE de 1,0 e 1,5 mm apresentaram aumento de espessura da ordem de 2%.

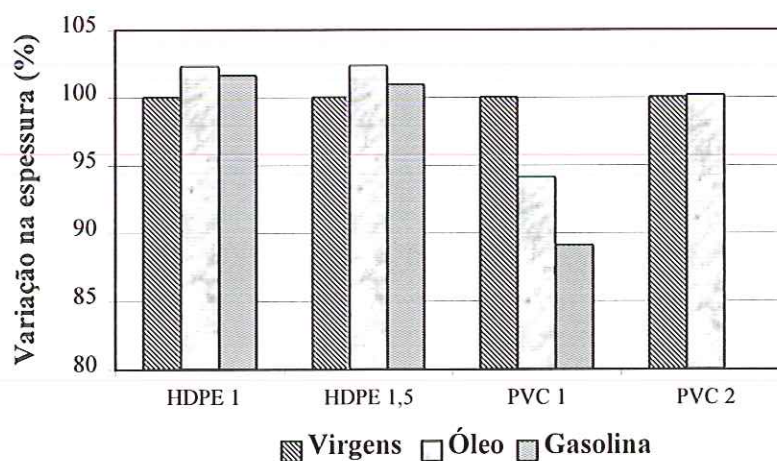


Figura 4.52. Relação entre as espessuras antes e após imersão em óleo diesel e gasolina por 6 meses.

Esperou-se aproximadamente 2 semanas para obter o peso das amostras imersas em gasolina e óleo diesel e perfuraram-se as bolhas formadas na amostra de PVC de 2,0 mm para favorecer a evaporação da gasolina.

A Figura 4.53 apresenta as variações do peso devido ao contato com gasolina e óleo diesel. As mantas de PVC em contato com óleo diesel apresentaram redução de peso da ordem de 15 % para a amostra de 1,0 mm e 7 % para a amostra de 2,0 mm. Já as amostras de HDPE, nas duas espessuras ensaiadas, apresentaram aumento de peso da ordem de 6%. As amostras de PVC em contato com a gasolina apresentaram redução da ordem de 27 % e 24 % para as amostras de 1,0 e 2,0 mm respectivamente. As amostras de HDPE apresentaram um ligeiro aumento de peso da ordem de 2%.

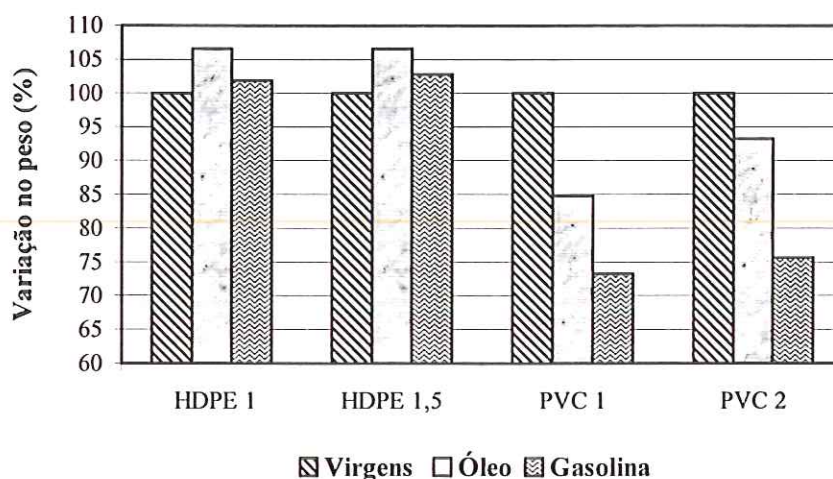


Figura 4.53. Relação entre os pesos antes e após imersão em óleo diesel e gasolina por 6 meses.

As alterações nas propriedades mecânicas provocadas por contato direto com óleo diesel e gasolina, foram avaliados através de ensaios de tração realizados após 6 meses de imersão. Os resultados foram comparados com resultados obtidos nas amostras virgens do mesmo lote, isto é, PVC do lote II e HDPE fornecidas pelo fabricante “B”. A Tabela 4.18 lista os resultados encontrados nos ensaios de tração e as Figuras 4.54 a 4.56 apresentam as porcentagens de variação encontradas para cada parâmetro analisado.

TABELA 4.18. Resultados encontrados no ensaio de tração em amostras de PVC e HDPE de diferentes espessuras após 6 meses de imersão em óleo diesel e gasolina.

Norma	ASTM D638					
Número de CP	3 CP em cada direção					
Parâmetros médios obtidos	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV
	(MPa)	(%)	(%)		(MPa)	(%)
PVC 1 mm - Long – Gasolina	22,17	3,3	444,9	4,80	288,3	3,4
PVC 1 mm - Trans – Gasolina	18,54	7,9	389,7	17,58	283,3	4,0
PVC 2mm - Long – Gasolina	*		*		*	
PVC 2 mm - Trans – Gasolina	*		*		*	
HDPE 1 mm - Long – Gasolina	16,76	6,9	18,77	1,4	355,8	4,0
HDPE 1 mm - Trans – Gasolina	17,26	5,8	16,62	2,8	383,3	6,5
HDPE 1,5 mm - Long – Gasolina	17,56	1,4	18,77	1,4	331,8	4,2
HDPE 1,5 mm - Trans – Gasolina	17,58	3,1	16,00	1,6	382,4	6,0
PVC 1 mm - Long – Óleo diesel	22,24	4,2	408,6	8,9	199,4	4,7
PVC 1 mm - Trans – Óleo diesel	19,76	7,9	388,8	12,4	206,2	4,4
PVC 2mm - Long – Óleo diesel	18,87	2,2	481,1	3,5	23,03	15,4
PVC 2 mm - Trans – Óleo diesel	20,56	3,6	436,3	7,3	22,95	23,2
HDPE 1 mm - Long – Óleo diesel	18,87	3,8	22,15	2,1	267,0	3,8
HDPE 1 mm - Trans – Óleo diesel	17,14	4,5	20,62	2,6	287,6	4,7
HDPE 1,5 mm - Long – Óleo diesel	16,61	3,2	21,54	1,2	274,1	4,8
HDPE 1,5 mm - Trans – Óleo diesel	16,71	6,3	20,31	4,5	272,1	4,4

* valores não determinados

De acordo com a Figura 4.54, tem-se que as amostras de PVC de 1,0 mm imersas em gasolina apresentaram aumento de resistência à tração de aproximadamente 45% nas duas direções ensaiadas. Já as amostras de polietileno apresentaram redução para as duas espessuras ensaiadas. O HDPE de 1,0 mm apresentou redução da ordem de 21 % na longitudinal e 16% na transversal e a amostra de 1,5 mm apresentou redução de aproximadamente 15 % nas duas direções ensaiadas. Na análise da influência do óleo diesel tem-se que as amostras de PVC também apresentaram aumento de resistência, (45% na direção longitudinal e 53 % na transversal para a amostra de 1,0 mm e 12 % na longitudinal e 38 % na transversal para a amostra de 2,0 mm) e as de HDPE apresentaram diminuição de

resistência (11% na direção longitudinal e 16 % na transversal para a amostra de 1,0 mm e 19 % na longitudinal e 21 % na transversal para a amostra de 1,5 mm)

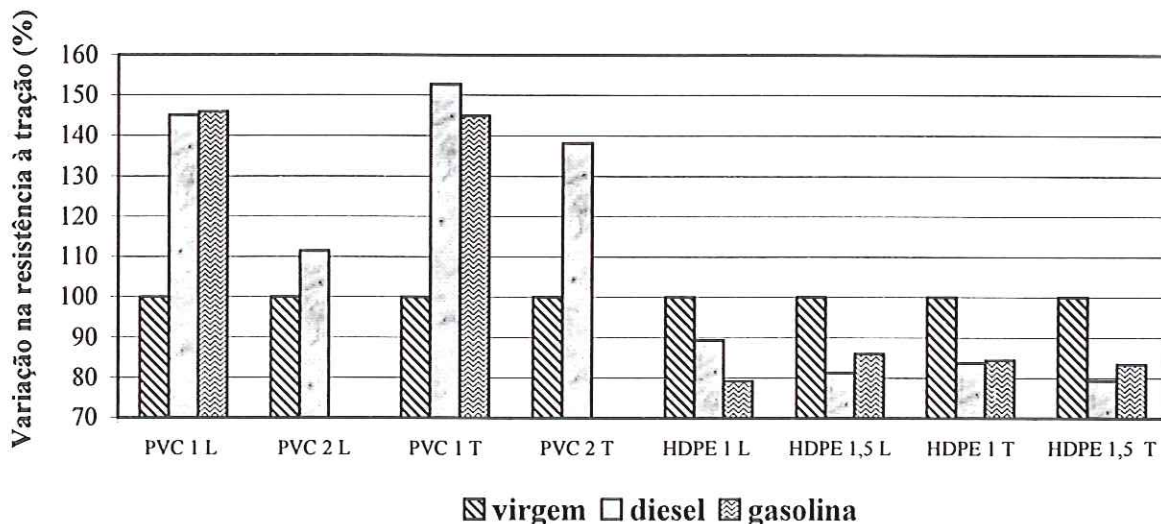


Figura 4.54. Variação de resistência à tração entre as amostras virgens e após imersão em gasolina e óleo diesel por 6 meses.

A Figura 4.55 apresenta as variações sofridas na deformação na ruptura devido ao contato com gasolina e óleo diesel. A amostra de PVC de 1,0 mm imersa em gasolina apresentou redução de deformação de 26 % na direção longitudinal e 40 % na transversal. Por sua vez as amostras de HDPE apresentaram aumento de deformação, após imersão em gasolina, com valores mais significativos para a amostra de 1,5 mm na direção longitudinal, com aumento da ordem de 23 %. Na análise da influência do óleo diesel, tem-se que as amostras de PVC apresentaram redução na deformação na ruptura, com maior variação para a amostra menos espessa, da ordem de 40% nas duas direções ensaiadas. O PVC de 2,0 mm praticamente não apresentou variação na direção longitudinal e mostrou redução da ordem 15 % na transversal. As amostras de HDPE apresentaram aumento de deformação atingindo maior variação a amostra de 1,5 mm na direção transversal, de aproximadamente 43 %.

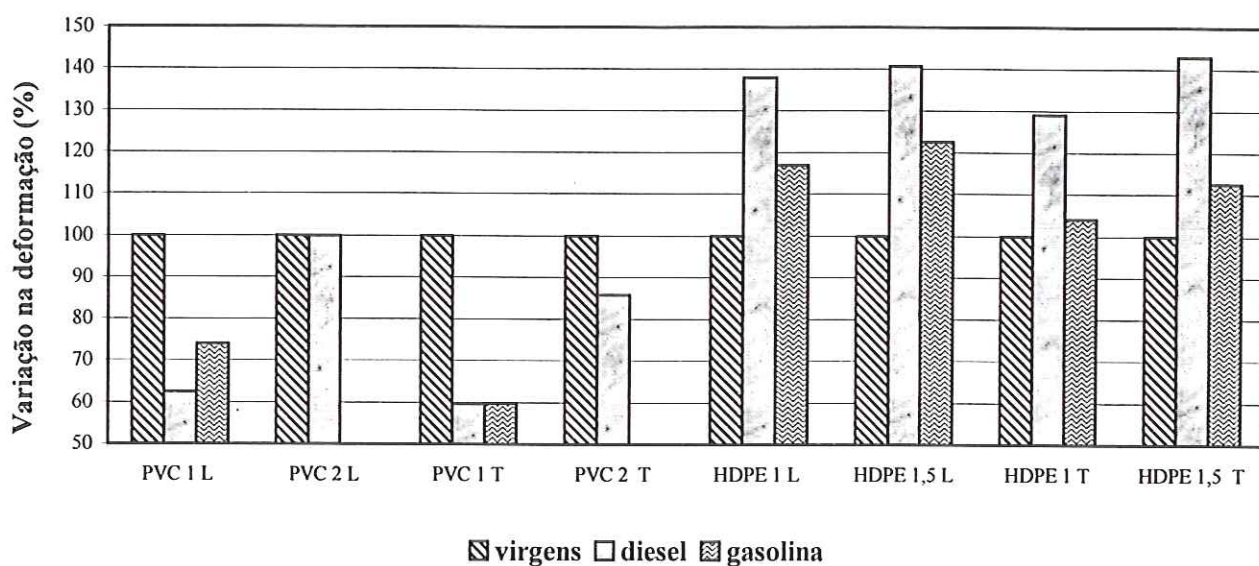


Figura 4.55. Variação na deformação na ruptura entre as amostras virgens e após imersão em gasolina por 6 meses.

Como se pode observar na Figura 4.56, as amostras de PVC de 1,0 mm apresentaram um grande aumento no módulo de elasticidade, após imersão em gasolina e óleo diesel atingindo valores superiores a 7000 % nas duas direções ensaiadas para a amostra imersa em gasolina e 5000 % para a amostra imersa em óleo diesel, o que vem a confirmar o enrijecimento identificado através do tato. As amostras de PVC de 2,0 mm imersas em óleo diesel também apresentaram aumento de módulo de elasticidade menores que as amostras de 1,0 mm, (da ordem de 257 % na longitudinal e de 300 % na direção transversal). Para ilustrar essa variação no módulo de elasticidade, a Figura 4.57 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios realizados na amostra de 1,0 mm na direção longitudinal, das amostras virgens (A) e nas amostras imersas em gasolina e óleo diesel (B). Pode-se observar a variação de inclinação da parte inicial da curva. As amostras de PVC de 2,0 mm imersas em gasolina, como citado anteriormente, apresentaram muitas bolhas, por intrusão da substância, o que impossibilitou a realização dos ensaios físicos e mecânicos.

Já as amostras de HDPE apresentaram redução no módulo. O HDPE imerso em gasolina apresentou redução nas duas espessuras ensaiadas com valores mais significativos (da ordem de 33 %) para o HDPE de 1,5 mm na direção longitudinal. As amostras imersas em óleo diesel também apresentaram redução do módulo de elasticidade da ordem de 43 % para as duas espessuras ensaiadas.

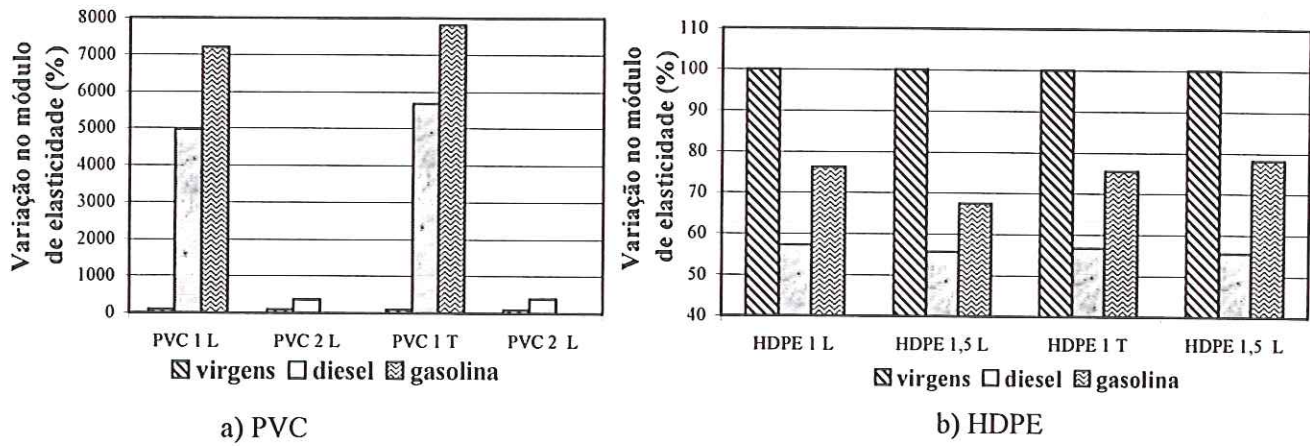


Figura 4.56. Relação entre o módulo de elasticidade das amostras de PVC e HDPE virgens e após imersão em gasolina e óleo diesel por 6 meses.

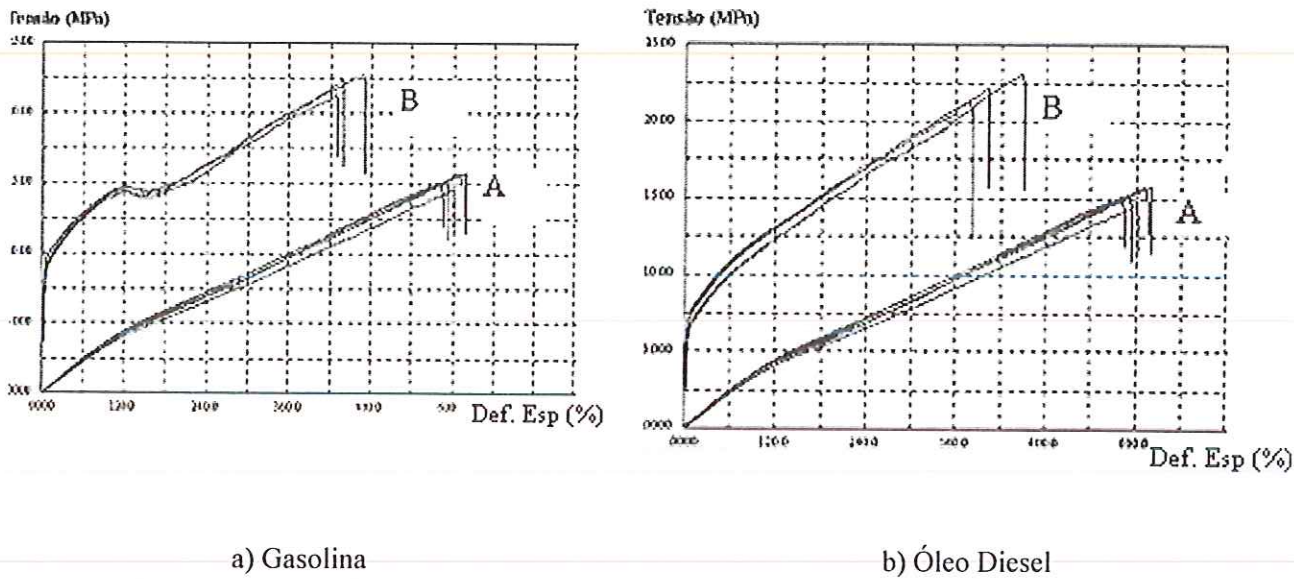


Figura 4.57. Curva tensão deformação: amostras de PVC de 1,0 mm virgem comparada às imersa em gasolina e óleo diesel. A – amostras virgens; B – Amostra imersas em gasolina (a) e óleo diesel (b).

Na análise das propriedades químicas foram realizados ensaios de TGA nas amostras de PVC, de acordo com a Tabela 4.19, e de DSC nas amostras de HDPE, segundo apresentado na Tabela 4.20.

TABELA 4.19. Resultados obtidos no ensaio de TGA para as amostras de PVC virgens e retiradas da estufa após 9 meses de exposição.

Parâmetros medidos	A (%)	Temperatura (°C)	B (%)	Temperatura (°C)	C (%)	Temperatura (°C)
PVC 1,0 mm						
Virgem	71,52	259,60	9,97	432,79	18,51	> 500 °C
Gasolina	48,96	257,98	15,40	431,94	21,64	> 500 °C
Óleo diesel	55,77	229,75	13,29	434,28	20,76	> 500 °C
PVC 2,0 mm						
Virgem	73,05	267,89	13,68	432,66	13,29	> 500 °C
Gasolina	50,14	255,54	16,28	428,28	19,33	> 500 °C
Óleo diesel	61,23	237,36	13,07	433,03	14,53	> 500 °C

(A)-degradação do plastificante e perda de HCl da cadeia do polímero, (B)-Polímero residual; (C)-resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e cinza.

Pode-se observar, de acordo com a Tabela 4.19, que as amostras de PVC imersas em gasolina e óleo diesel apresentam redução significativa do parâmetro (A) quando comparadas às amostras virgens. O parâmetro (A) corresponde à degradação do plastificante e à perda de HCl da cadeia polimérica, o que ocorre a temperaturas superiores a 200 °C. De acordo as Figuras 4.58 a 4.61, que trazem os gráficos obtidos no ensaio para as amostras imersas em gasolina e diesel, pode-se perceber a presença de um pico de derretimento inferior à temperatura de 200 °C. Este primeiro processo de derretimento foi atribuído à evaporação da gasolina ou óleo diesel presentes nas amostras ensaiadas, ou a outro tipo de substância formada pela reação dessas substâncias com algum componente da geomembrana. As mudanças ocorridas no parâmetro (A) foram avaliadas através da análise do segundo processo de derretimento. Dessa maneira, pôde-se estimar uma redução do parâmetro (A) em cerca de 32 % para a amostra de 1,0 mm imersa em gasolina e 22,0 % para a amostra imersa em óleo diesel. A amostra de 2,0 mm apresentou redução da ordem de 31 % para a amostra imersa em gasolina e 16 % para a amostra imersa em óleo diesel. Estas variações estão de acordo com os resultados encontrados nos ensaios mecânicos, os quais demonstraram aumento de rigidez em todas as amostras submetidas à degradação, com valores mais significativos para as amostras menos espessas. Pôde-se também observar uma maior sensibilidade à degradação nas amostras em contato com a gasolina. A Figura 4.62 apresenta



uma comparação, das curvas obtidas no ensaio de TGA, entre as amostras virgens e as amostras imersas em gasolina e diesel para as duas espessuras ensaiadas.

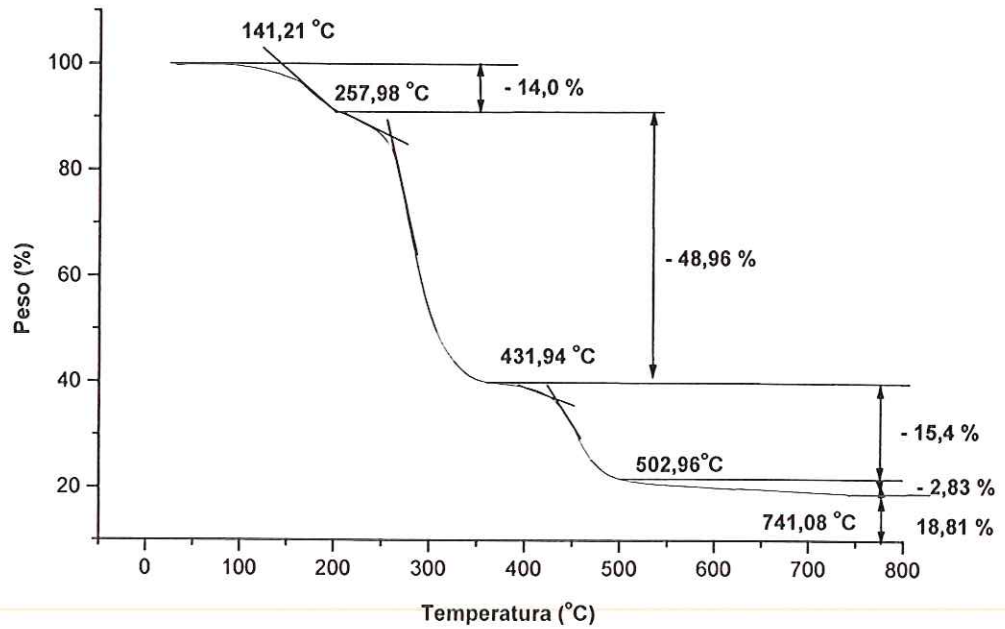


Figura 4.58. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 1,0 mm imersa em gasolina.

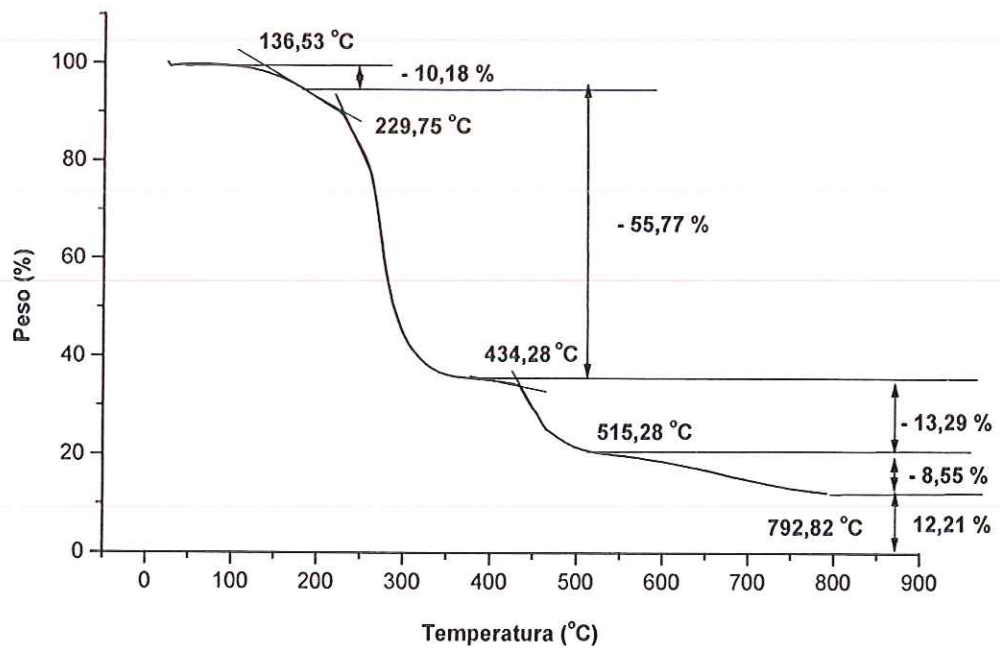


Figura 4.59. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 1,0 mm imersa em Óleo diesel.

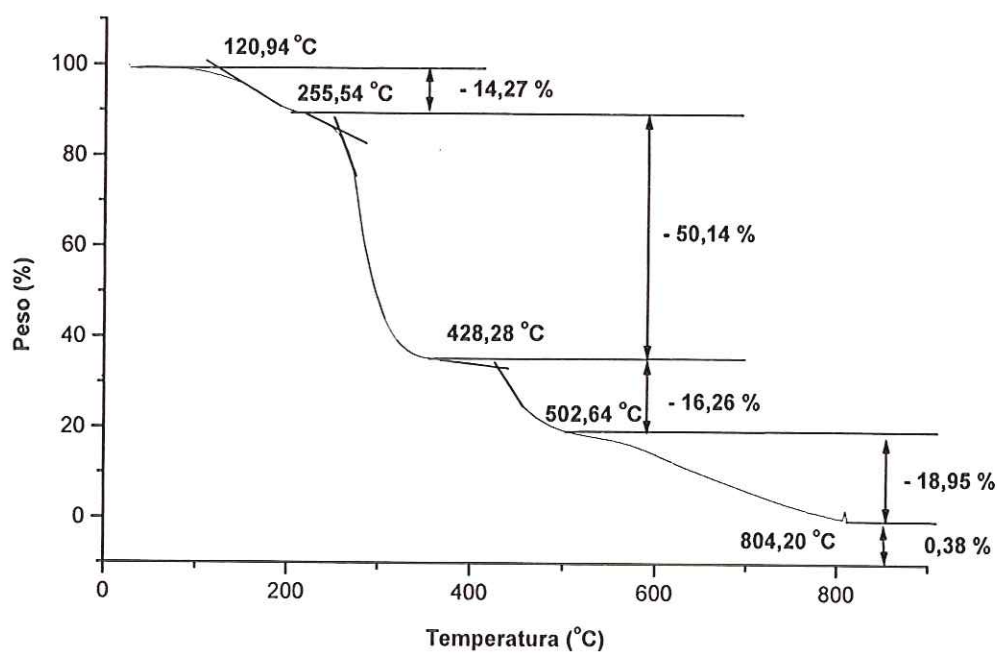


Figura 4.60. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 2,0 mm imersa em gasolina.

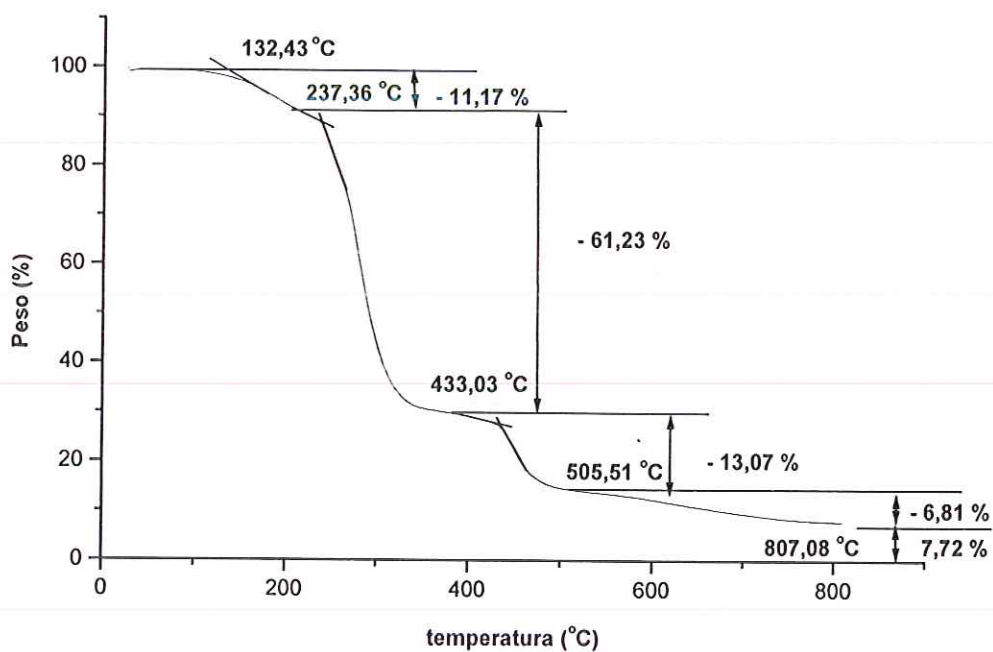


Figura 4.61. Ensaio de TGA. Amostra de PVC de 2,0 mm imersa em Óleo diesel.

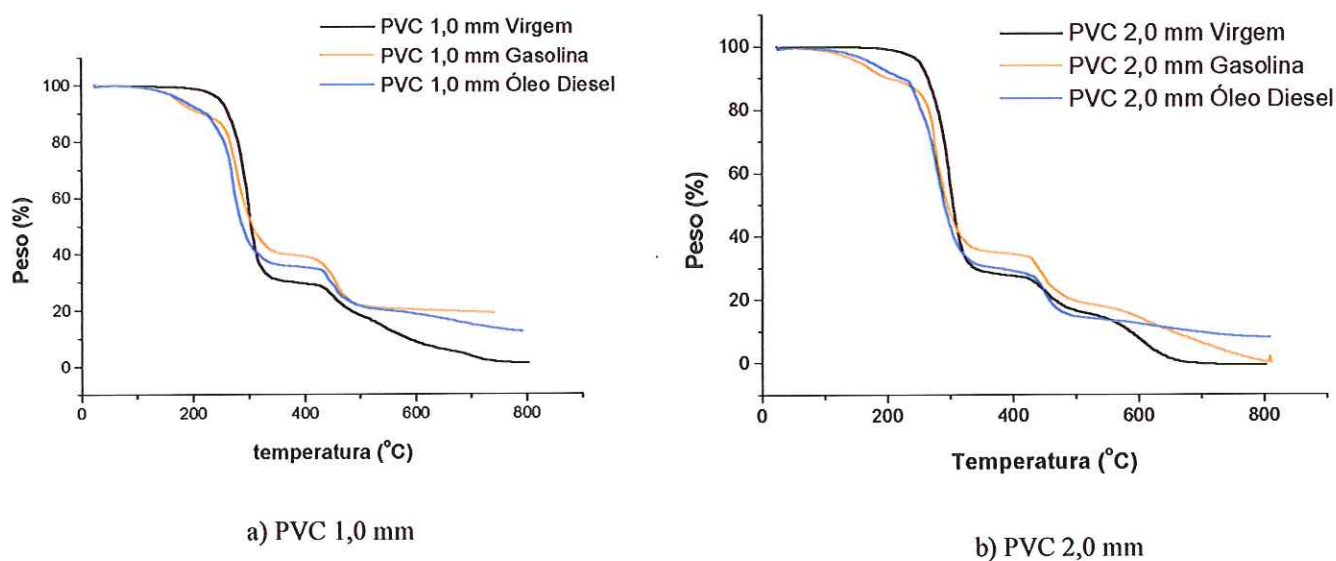
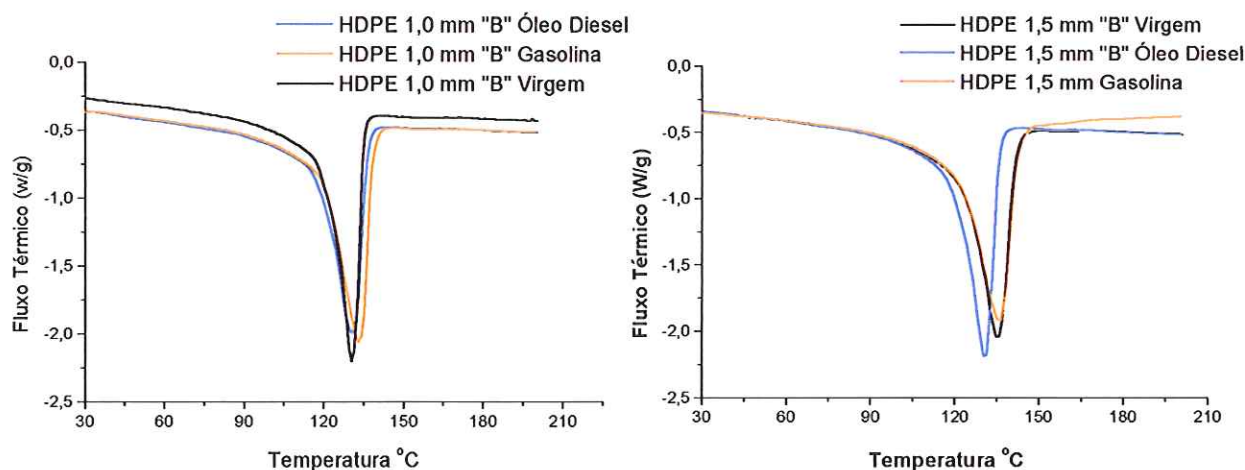


Figura 4.62. Ensaio de TGA. Amostras virgens de PVC de 1,0 e 2,0 mm comparadas às imersas em gasolina e óleo diesel.

Os resultados obtidos no ensaio de DSC realizado nas amostras de HDPE são os constantes da Tabela 4.20. A Figura 4.631 apresenta uma comparação entre as curvas obtidas nas amostras virgens e nas amostras submetidas à degradação.

TABELA 4.20. Resultados obtidos no ensaio de DSC realizado nas amostras de HDPE virgens e imersas em gasolina e óleo diesel.

Parâmetros medidos	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (ΔH) (J/g)	% de cristalinidade
HDPE de 1,0 mm - fornecedor "B"			
Amostra virgem	130,33	125,7	44,1
Gasolina	132,92	139,0	48,8
Óleo diesel	130,52	129,7	45,5
HDPE de 1,5 mm - fornecedor "B"			
Amostra virgem	135,30	144,4	50,7
Gasolina	135,85	147,8	51,9
Óleo diesel	130,71	134,2	47,1



a) HDPE de 1,0 mm - fornecedor "B"

b) HDPE de 1,5 mm - fornecedor "B"

Figura 4.63. Ensaio de DSC. Amostras virgens de HDPE de 1,0 e 1,5 mm comparadas às imersas em gasolina e óleo diesel.

Pôde-se observar, de acordo os resultados obtidos no ensaio de DSC que a amostra de HDPE de 1,0 mm imersa em gasolina apresentou aumento de cristalinidade mais pronunciado, da ordem de 11 %, e a amostra imersa em óleo diesel apresentou aumento de, aproximadamente, 3 %. A amostra de 2,0 mm imersa em gasolina apresentou aumento de cristalinidade de, aproximadamente, 2 %, enquanto, a amostra imersa em óleo diesel, apresentou redução da ordem de 7 %.

Não foi observada variação significativa na temperatura de fusão.

Não foi possível relacionar as variações encontradas no ensaio de DSC com o comportamento mecânico das amostras submetidas à degradação.

Como síntese dos resultados encontrados, tem-se que:

Parâmetros físicos:

- Contato com a gasolina: as amostras de PVC apresentaram muita sensibilidade à gasolina. A amostra de 1,0 mm apresentou redução de espessura da ordem de 11 % e de peso da ordem de 27 %. As amostras de 2,0 mm apresentaram muitas bolhas o que impossibilitou a determinação da espessura e a realização dos ensaios mecânicos. Depois de perfurar as bolhas determinou-se a variação de peso, que correspondeu a uma redução de cerca de 24 %. Pôde-se também observar que tanto as amostras de 1,0 como de 2,0 mm estavam bastante enrijecidas e que sofreram contração. Já as amostras de HDPE não apresentaram variações significativas nem

de peso nem de espessura, além de não apresentarem nenhum sinal visual de degradação.

- Contato com óleo diesel: as amostras de PVC apresentaram redução de peso e de espessura menos significativas que as amostras em contato com a gasolina. Não apresentaram presença de bolhas, mas pode-se constatar, através do contato manual, que a amostra menos espessa estava bastante enrijecida. As amostras de HDPE não apresentaram variações significativas.

Parâmetros mecânicos:

Exposição à gasolina:

- Ensaio de tração: a amostra de PVC de 1,0 mm, em contato com a gasolina, apresentou-se bastante enrijecida, o que foi retratado pelo aumento de resistência à tração em, aproximadamente, 45 % nas duas direções ensaiadas, redução de deformação na ruptura de, 26 % na longitudinal e de 40 % na transversal o que resultou num grande aumento de módulo de elasticidade, superior a 7000 % nas duas direções. Devido à presença de inúmeras bolhas na amostra de 2,0 mm, foi impossível a realização dos ensaios mecânicos.

O HDPE, ao contrário do PVC, apresentou um comportamento mais dúctil, retratado pela redução de resistência à tração (21 % na longitudinal e 16 % na transversal para a amostra de 1,0 mm e de 15 % nas duas direções para a amostra de 1,5mm) aumento de deformação, com valores mais significativos para a amostra de 1,5 mm, da ordem de 23 % e redução no módulo de elasticidade da ordem de 33 % também para a amostra de 1,5 mm na direção longitudinal.

Exposição ao óleo diesel:

- Ensaio de tração: as amostras de PVC e HDPE apresentaram um comportamento similar às amostras imersas à gasolina, porém sem apresentar presença de bolhas em nenhuma das amostras.

As amostras de PVC apresentaram aumento de resistência à tração de aproximadamente 45 % na direção longitudinal, e 53 % na transversal para a amostra menos espessa. Para a amostra mais espessa esses valores foram de 12 % na longitudinal e 38 % na transversal .Ocorreu redução de deformação na ruptura de, aproximadamente, 40 % nas duas direções ensaiadas, para a amostra de 1,0 mm; a amostra de 2,0 mm praticamente não apresentou variação na direção longitudinal,

mas mostrou e redução da ordem de 15 % na transversal. Isto redundou num aumento do módulo de elasticidade superior a 5000 % nas duas direções para a amostra de 1,0 mm, para a amostra de 2,0 mm, esse aumento foi da ordem de 250 % nas duas direções. O HDPE em contato com óleo diesel apresentou um comportamento mais dúctil, retratado pela redução de resistência à tração (11 % na longitudinal e 16 % na transversal para a amostra de 1,0 mm e de 19 % na longitudinal e 21 % na transversal para a amostra de 1,5mm); aumento de deformação da ordem de 43 % para a amostra de 1,5 mm, e redução da ordem de 43 % no módulo de elasticidade, também para a amostra de 1,5 mm, na direção longitudinal.

Parâmetros químicos:

- Ensaio de TGA: as amostras de PVC de 1,0 mm apresentaram redução do parâmetro (A) em aproximadamente 32 % para a amostra de 1,0 mm imersa em gasolina e 22 % para a amostra imersa em óleo diesel. A amostra de 2,0 mm apresentou redução da ordem de 31 % para a amostra imersa em gasolina e 16 % para a amostra imersa em óleo diesel.
- Ensaio de DSC: a amostra de HDPE de 1,0 mm apresentou aumento de cristalinidade tanto para a amostra em contato com gasolina quanto com óleo diesel, porém a amostra em contato com a gasolina apresentou um aumento mais pronunciado, da ordem de 11 %. Já amostra de 1,5 mm apresentou aumento de cristalinidade para a amostra em contato com a gasolina, de cerca de 2 %, e diminuição, de aproximadamente 7 %, para a amostra imersa em óleo diesel.

Pôde-se concluir que a influência da gasolina e do óleo diesel foi mais significativa para as amostras de PVC, e o efeito da degradação foi mais pronunciada na amostra menos espessa. Já para o HDPE ocorreu o contrário tanto para as amostras em contato com a gasolina quanto com o óleo diesel, onde foi registrada uma maior degradação em alguns parâmetros analisados para amostra mais espessa na direção longitudinal. Os resultados encontrados estão coerentes com as informações encontradas em tabelas de resistência química das geomembranas encontrados na literatura (KOERNER, 1997, AGNELLI, 1992, entre outros), onde tem-se que a resistência do PVC a solventes orgânicos é considerada moderada ou não resistente enquanto as geomembranas de

HDPE são consideradas resistentes. Registra-se, no entanto, que estas foram de alguma forma afetadas, embora com intensidade inferior à registrada nas mantas de PVC.

4.6. Comparação entre as amostras virgens e as amostras levadas à lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos

A Tabela 4.21 mostra as variações das propriedades físicas registradas nas geomembranas imersas em lagoa de chorume, após 5 e 8 meses. Pôde-se observar que as amostras de PVC e as de HDPE apresentaram variação de peso e espessuras inferiores a 2 %.

TABELA 4.21. Resultados médios de espessura e peso, em amostras de PVC e HDPE de diferentes espessuras antes e após imersão na lagoa de chorume por períodos de 5 e 8 meses.

Geomembranas		Peso (g)	Espessura média (cm)
PVC 1 mm	Antes da imersão	184,19	0,982
Lote I	Após 5 meses	184,24	0,963
PVC 1 mm	Antes da imersão	179,88	0,980
Lote I	Após 8 meses	179,24	0,974
PVC 2 mm	Antes da imersão	388,01	2,058
Lote I	Após 5 meses	387,11	2,014
PVC 2 mm	Antes da imersão	379,50	2,028
Lote I	Após 8 meses	375,58	2,005
HDPE 1 mm	Antes da imersão	136,06	0,972
Fornecedor "A"	Após 5 meses	136,08	0,969
HDPE 1 mm	Antes da imersão	133,06	0,973
Fornecedor "A"	Após 8 meses	133,10	0,948
HDPE 1,5 mm	Antes da imersão	153,98	1,580
Fornecedor "A"	Após 5 meses	154,11	1,545
HDPE 1,5 mm	Antes da imersão	153,31	1,530
Fornecedor "A"	Após 8 meses	154,03	1,479

Os resultados de ensaios mecânicos realizados nas amostras virgens (PVC amostras lote I e HDPE fornecidas pelo fabricante "A") e nas amostras após imersão em chorume encontram-se na Tabela 4.22.

TABELA 4.22. Resultados médios obtidos nos ensaios de tração, rasgo e punção realizados em amostras de PVC e HDPE retiradas da lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos após 5 e 8 meses de imersão.

Ensaio	Tração						Rasgo		Punção			
Norma	ASTM D 638						ASTM D 1004		ASTM D 4833			
Número de CP	3 CP cada direção						3 CP cada direção		2 CP			
Resultados médios obtidos após 5 meses	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1,0 mm - Long	15,55	2,5	499,3	3,1	6,15	4,0	45,95	10,6	2,15	0,4	232,9	5,2
PVC 1,0 mm - Trans	13,52	1,6	496,1	1,9	5,93	1,5	48,66	6,4				
PVC 2,0 mm - Long	16,76	2,7	479,0	4,0	6,60	1,9	102,4	8,7	2,51	14,4	519,6	0,8
PVC 2,0 mm - Trans	14,78	1,5	504,7	2,5	6,41	1,4	105,1	5,1				
HDPE 1,0 mm - Long	11,89	1,6	22,00	1,2	160,6	22,2	115,9	4,0	1,96	6,7	306,3	3,0
HDPE 1,0 mm - Trans	12,22	0,5	18,31	1,5	171,9	4,6	120,6	1,4				
HDPE 1,5 mm - Long	12,83	5,0	18,77	1,4	204,6	5,9	166,7	3,0	1,63	6,3	420,4	1,3
HDPE 1,5 mm - Trans	14,05	1,7	16,00	1,7	233,6	6,8	177,3	2,8				
Resultados médios obtidos após 8 meses	σ_{rupt}	CV	ϵ_{rupt}	CV	E	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV	Defl.	CV	$F_{m\acute{a}x}$	CV
	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(N)	(%)	(cm)	(%)	(N)	(%)
PVC 1,0 mm - Long	15,01	3,0	484,6	4,0	5,96	5,5	46,27	2,0	2,8	8,0	305,8	9,7
PVC 1,0 mm - Trans	13,56	0,8	491,4	2,7	5,67	2,6	49,8	16,1				
PVC 2,0 mm - Long	15,57	1,7	478,7	2,6	5,82	3,4	93,02	3,3	2,25	7,1	551,8	1,3
PVC 2,0 mm - Trans	14,27	4,0	475,7	4,8	5,83	2,8	93,23	1,9				
HDPE 1,0 mm - Long	10,93	4,4	22,31	4,3	188,3	8,2	106,3	5,9	2,05	2,1	297,7	0,3
HDPE 1,0 mm - Trans	10,22	4,7	17,23	1,5	206,8	10,0	92,54	7,3				
HDPE 1,5 mm - Long	12,73	8,4	19,23	2,8	234,6	13,2	147,2	1,0	1,75	1,1	442,4	0,1
HDPE 1,5 mm - Trans	10,56	1,6	14,46	1,8	238,5	5,5	159,4	2,8				

As Figuras 4.64, 4.65 e 4.66 apresentam as variações dos parâmetros encontrados nos ensaios de tração. De acordo com a Figura 4.64 tem-se que as amostras de PVC apresentaram variações de resistência à tração pouco significativas nos dois períodos de amostragem, apresentando redução máxima da ordem de 6 % após 8 meses. Para as amostras de HDPE as variações mais significativas corresponderam à redução de resistência após 8 meses em contato com percolado, na amostra de 1,0 mm na direção transversal, de

aproximadamente 17% e na amostra de 1,5 mm, também na transversal, de aproximadamente 22%.

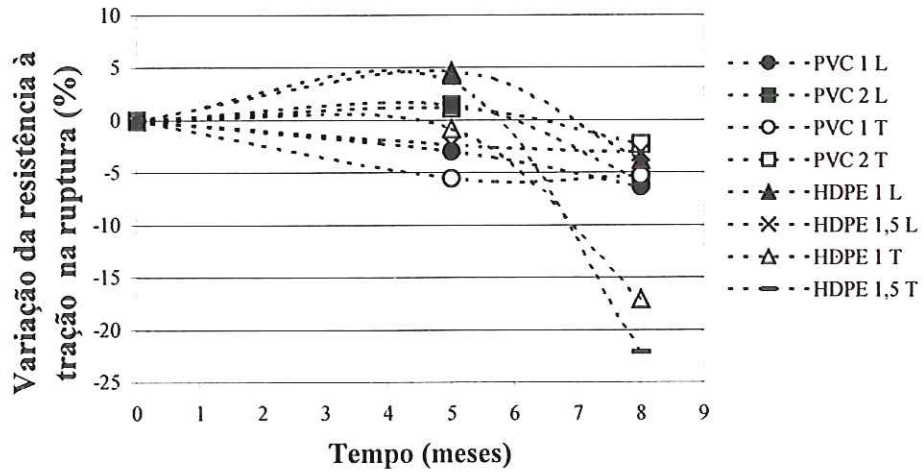


Figura 4.64. Variação da resistência à tração na ruptura com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

Como pode ser visto na Figura 4.65, as amostras de PVC apresentaram redução de deformação na ruptura nos dois períodos de amostragem, com variações mais acentuadas para a amostra menos espessa, da ordem de 8% nas duas direções, após 8 meses em contato com o chorume. As amostras de HDPE apresentaram redução de deformação na direção transversal (4 % para a amostra de 1,0 mm e 11 % para a amostra de 1,5 mm). Já na direção transversal apresentaram aumento de deformação de aproximadamente 8 % e 19 % para as amostras de 1,0 e 1,5 mm respectivamente.

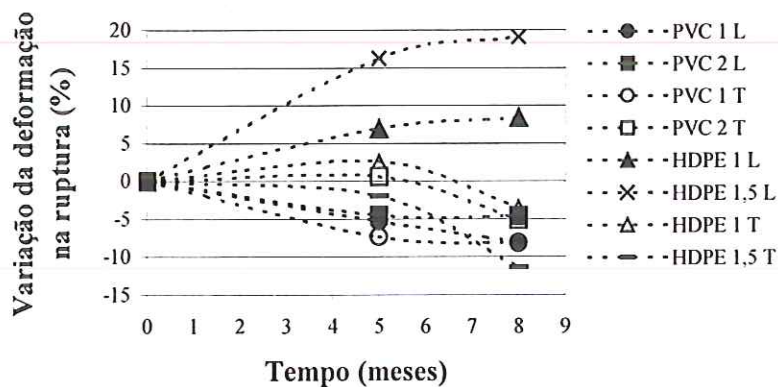


Figura 4.65. Variação da deformação na ruptura com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

Na análise do módulo de elasticidade, constatou-se, de acordo com a Figura 4.66, que as amostras de PVC apresentaram tendência de aumento de resistência com 5 meses, com variação mais significativa para a amostra de 2,0 mm na longitudinal (aumento de aproximadamente 14 %), seguida de diminuição após 8 meses, atingindo valores próximos aos das amostras virgens. Já para as amostras de HDPE ocorreu o contrário. Tendência de diminuição com 5 meses, da ordem de 22 % para o HDPE de 1,0 mm, na direção transversal, seguido de aumento até valores próximos aos iniciais após 8 meses.

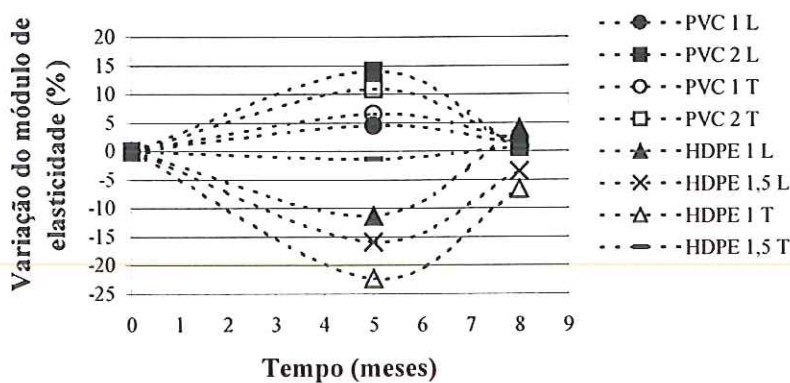


Figura 4.66. Variação do módulo de elasticidade com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

A Figura 4.67 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de rasgo. Tem-se que as geomembranas de PVC de 1,0 e 2,0 mm apresentaram pouca variação de resistência atingindo aumento ou redução de resistência da ordem de 5% após 8 meses. As amostras de HDPE apresentaram redução de resistência ao rasgo nos dois períodos ensaiados com valores mais significativos, da ordem de 22%, para a amostra de 1,0 mm na direção transversal após 8 meses.

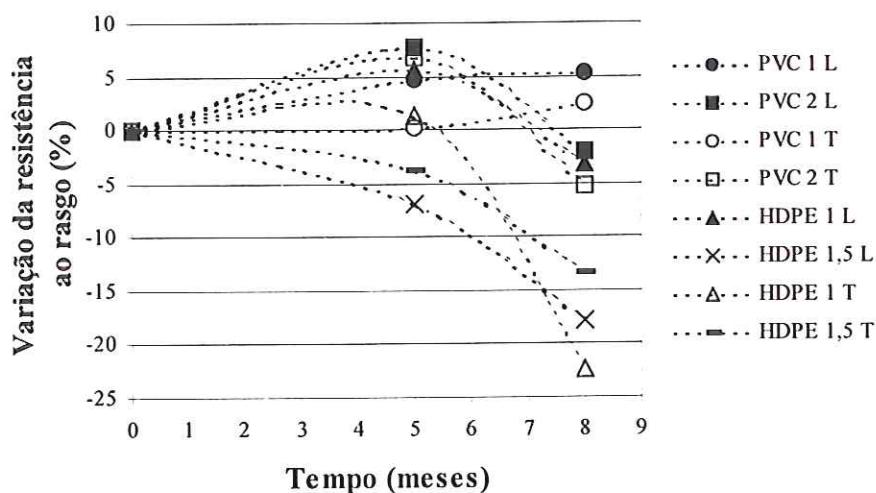


Figura 4.67. Variação da resistência ao rasgo com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

As Figuras 4.68 e 4.69 apresentam os resultados encontrados nos ensaios de punção. De acordo com a Figura 4.68, a amostra de PVC de 1,0 mm apresentou redução na resistência ao puncionamento com 5 meses, de aproximadamente 8%, seguido de aumento para 21 % após 8 meses. A amostra de PVC de 2 mm apresentou aumento nos dois períodos de amostragem, atingindo um acréscimo da ordem de 15 % após 8 meses. A geomembrana de HDPE de 1,0 mm apresentou redução com 1 mês (aproximadamente 11%) e 8 meses (aproximadamente 14 %). A manta de 1,5 mm não apresentou variação significativa nos dois períodos de amostragem.

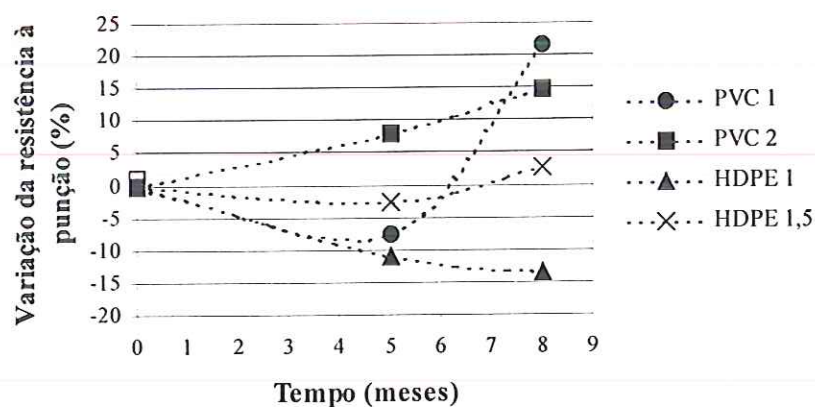


Figura 4.68. Variação da resistência ao puncionamento com o tempo de na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

De acordo com a Figura 4.69, tem-se que a manta de PVC de 2,0 mm apresentou variação pouco significativa na deformação na ruptura durante todo o período de exposição,

apresentando aumento da ordem de 5 % com 5 meses e redução a valores próximos aos iniciais após 8 meses. A manta de PVC de 1,0 mm apresentou redução de deflexão com 5 meses, da ordem de 7 %, seguido de aumento após 8 meses de aproximadamente 20%. O polietileno de 1,0 mm apresentou diminuição com 5 meses, de aproximadamente 22 %, seguido de um ligeiro aumento com 8 meses, mas ainda mantendo redução da ordem de 16 % após 8 meses. A amostra de 1,5 mm apresentou aumento durante os dois períodos de amostragem com aumento da ordem de 10% após 8 meses.

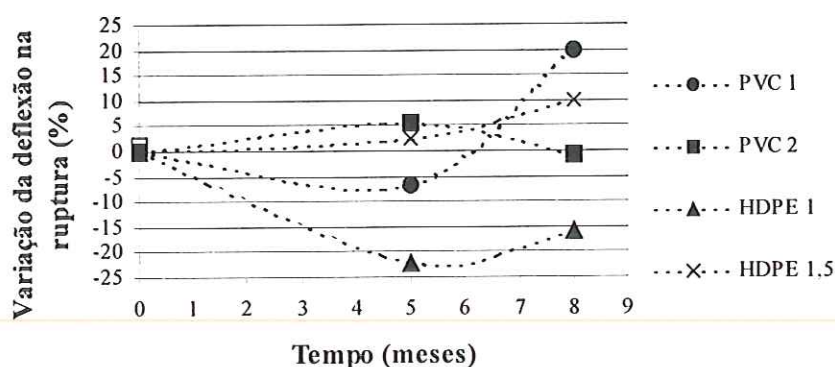


Figura 4.69. Variação da deflexão na ruptura com o tempo de imersão na lagoa de chorume de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

Síntese dos resultados com as geomembranas imersas em lagoa de chorume:

- Parâmetros físicos: as amostras de PVC e HDPE não apresentaram variações significativas de peso e espessura.
- Ensaio de tração:

As amostras de PVC praticamente não apresentaram variações nos parâmetros obtidos no ensaio de tração (variações inferiores a 8 %). As amostras de HDPE apresentaram variações mais significativas, com redução de resistência, de aproximadamente, 22 % na direção transversal e aumento de deformação da ordem de 19 % para a amostra de 1,5 mm após 8 meses.
- Ensaio de rasgo: as amostras de PVC apresentaram pouca variação de resistência ao rasgo durante os dois períodos ensaiados, atingindo aumento ou redução de resistência da ordem de 5%. As amostras de HDPE apresentaram redução de resistência ao rasgo nos dois períodos ensaiados apresentando redução da ordem de 20 % após 8 meses, na direção transversal, para as duas espessuras ensaiadas.
- Ensaio de punção:

Resistência ao puncionamento: a amostra de PVC de 1,0 mm apresentou redução na resistência após 5 meses seguido de aumento para 21 % após 8 meses. A manta de 2,0 mm apresentou aumento nos dois períodos de amostragem atingindo um acréscimo da ordem de 15 % após 8 meses. O HDPE de 1,0 mm apresentou redução nos dois períodos de amostragem, com redução de cerca 14 % após 8 meses. A amostra de 1,5 mm não apresentou variação significativa nos dois períodos de amostragem.

Deformação correspondente: o PVC de 1,0 mm apresentou redução de deflexão com 5 meses ordem seguido de aumento após 8 meses de aproximadamente 20%, Enquanto a amostra de 2,0 mm apresentou variação pouco significativa durante todo o período de exposição. A amostra de HDPE menos espessa apresentou diminuição com 5 meses de aproximadamente 22 % seguido de um ligeiro aumento com 8 meses, mas ainda mantendo redução da ordem de 16 % após 8 meses. A amostra de 1,5 mm apresentou aumento durante os dois períodos de amostragem com aumento da ordem de 10% após 8 meses.

5. CONCLUSÃO

5.1 Amostras submetidas ao envelhecimento natural

As amostras de PVC de 1,0 mm retiradas do Aterro Experimental, após 18 meses, apresentaram-se um pouco enrijecidas, o que resultou em aumento das resistências à tração, punção e rasgo e diminuição da deformação na ruptura, mas ainda apresentando deformações superiores a 250% no ensaio de tração. Contraditoriamente, a amostra texturizada de PVC de 1,0 mm retirada do Aterro Classe I, após 12 anos de utilização, mostrou variações desprezíveis quando comparada à amostra virgem tomada como referência.

Já a amostra de HDPE de 1,0 mm retirada do Aterro Experimental, não apresentou variações significativas em nenhum parâmetro analisado, podendo-se considerar as pequenas variações encontradas como dentro dos próprios coeficientes de variação dos ensaios.

Os resultados obtidos nas amostras imersas na lagoa de chorume mostraram pequenas variações em relação às amostras virgens. Estas variações não apresentaram tendência de aumento ou diminuição uniforme com o tempo. Em alguns parâmetros analisados, as amostras de HDPE foram mais afetadas que as amostras de PVC.

5.2 Amostras envelhecidas em laboratório

Os resultados obtidos para as geomembranas expostas à temperatura permitiram concluir que as amostras de PVC, assim como as de HDPE, mostraram variações, em maior ou menor escala, nas propriedades mecânicas. Estas variações não foram uniformes ao longo do tempo, ocorrendo ora aumento, ora diminuição dos valores medidos. De uma forma geral, as amostras de HDPE dos dois fornecedores mostraram-se um pouco mais sensíveis à temperatura que as amostras de PVC. Pôde-se também observar que, para o PVC, o efeito da degradação foi mais pronunciado, na maioria dos casos, na amostra menos espessa (1,0 mm). Já para o HDPE, foi registrada uma maior degradação em alguns parâmetros analisados para a amostra mais espessa ensaiada (1,5 mm).

Já a influência da gasolina e do óleo diesel foi mais significativa para as amostras de PVC que para as amostras de HDPE. O PVC mostrou-se bastante rígido com modificações no módulo de elasticidade que atingiram valores médios de cerca de 6.000 % quando comparados à amostra intacta. Ao contrário, o HDPE apresentou um comportamento mais dúctil revelado por uma redução média de cerca de 30 % no módulo de elasticidade.

5.3 Ensaio térmicos

Os ensaios térmicos permitiram concluir que, para o PVC, as pequenas perdas de plastificante não puderam ser identificadas através do ensaio de TGA. Porém, para perdas mais significativas (grandes variações no parâmetro A), como nas amostras em contato com gasolina e óleo diesel, foi observada uma redução de plastificante, condizente com as variações encontradas nos parâmetros mecânicos. Já as amostras de HDPE submetidas ao ensaio de DSC apresentaram ligeiras variações na porcentagem de cristalinidade, porém não foi possível uma associação com as mudanças nas propriedades mecânicas.

Pôde-se também observar uma grande diferença nos resultados mecânicos entre as amostras de polietileno dos dois fornecedores. As amostras do fornecedor "A" apresentaram resistência mecânica bem inferiores às amostras do fornecedor "B". Uma possível explicação para esta diferença de resistência pode ser a diferença no comportamento químico observado no ensaio de DSC. As amostras do fornecedor "A" apresentaram picos duplos de derretimento o que sugere que estas sejam constituídas da mistura de dois materiais diferentes. Como todas as amostras de PVC foram fornecidas pelo mesmo fabricante, não foi possível avaliar alguma eventual variabilidade entre fabricantes.

Por fim, enfatiza-se que as conclusões apresentadas são válidas apenas para as condições de ensaio adotadas neste trabalho e não podem ser extrapoladas para tempos de exposição maiores, nem para substâncias diferentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NORMAS TÉCNICAS

ABNT – 1987- Resíduos Sólidos: Classificação – NBR 10004/87

ABNT – 1997 - Geossintéticos – NBR 12553/97

ASTM D – 297 (1993) Standard Test Methods for Rubber Products – Chemical Analysis.

ASTM D – 374 (1994) Standard Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation

ASTM D –573 (1981) Standard Test Method for Rubber – Deterioration in an Air Oven.

ASTM D – 638 (1984) Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics.

ASTM D – 751 (1979) Standard Methods of Testing Coated Fabrics.

ASTM D – 792 (1979) Standard Test Methods for Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement.

ASTM D – 822 (19983) Standard Test Methods Tensile Properties of Thin Plastics Sheeting.

ASTM D – 1004 (1981) Standard Test Method for Initial Tead for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting.

ASTM D –1042 (1993) Standard Test Methods for Linear Dimensional Changes of Plastics under Accelerated Service Conditions.

ASTM D – 1149 (1981) Standard Test Method for Rubber Deterioration – Surface Ozone Cracking in a Clamber (Flat Specimens).

ASTM D –1204 (1984) Standard Test Method for Linear Dimensional Changes of Non – Thermoplastic Sheeting or Film at Elevated Temperature.

ASTM D – 1593 (1981) Standard Specification for Non-rigid Vinylchloride Plastic Sheeting.

ASTM D – 1603 (1994) Standard Test Methods for Carbon Black in Olefin Plastics.

ASTM D – 1693 (1976) Standard Test Method for Carbon Black in Olefin Plastics.

ASTM D – 1790 (1983) Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastic Sheeting by Impact.

ASTM D – 1938 (1978) Standard Test Method for Tear Propagation Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by a Single Tear Method.

ASTM D –2228 (1983) Standard Test Method for Rubber Property – Abrasion Resistance.

ASTM D – 2240 (1986) Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness.

ASTM D –2552 (1980) Standard Test Method for Environmental Stress Rupture of Type III Polyethylenes under Constant Tensile Load.

ASTM D –2259 (1996) Standard Test Method for Shrinkage of Yarns.

ASTM D – 2261 (1996) Standard Test Method for Tearing Strength of Fabrics by the Tongue (Single Rip).

ASTM D – 3015 (1978) Standard Recommended Practice for Microscopical Examination of Pigment Dispersion in Plastic Compounds.

ASTM D – 3417 (1982) Standard Test Method for Heats of Fusion and Crystallization of Polymers by Thermal Analysis.

ASTM D – 3418 (1982) Standard Test Method for Transition temperatures of Polymers by Thermal Analyses.

ASTM D – 3421 (1975) Standard Recommended Practice for Extraction and Analysis of Plasticizer Mixtures from Vinyl Chloride Plastics.

ASTM D – 3776 (1979) Standard Test Method for Weight (Mass per Unit Area) of Woven Fabric.

ASTM D – 4060 (1984) Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser

ASTM D – 4439 (1995) Standard Terminology for Geosynthetics.

ASTM D – 4833 (1988) Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geotextiles, Geomembranes, and Relatex Products.

ASTM D – 4885 (1988) Standard Test Method for Determining Performance Strength of Geomembranes by the Wide Strip Tensile Method.

ASTM D – 5321 (1992) Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method.

ASTM D – 5322 (1992) Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids.

ASTM D – 5397 (1995) Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Tensile Load Test.

ASTM D – 5494 (1993) Standard Test Method for the Determination of Pyramid Puncture resistance of Unprotected and Protected Geomembranes.

ASTM D – 5496 (1996) Standard Practice for in Field Immersion Testing of Geosynthetics.

ASTM D – 5994 (1996) Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes

ASTM E 96 (1980) Standard Test Method for Water Vapor Transmission of Materials.

ASTM G 22 (1980) Standard Test Method for Determining Resistance of Plastic to Bacteria.

AGNELLI, J. A. M. (1992). Introdução a Materiais Geossintéticos, DEMA, UFSCar, São Carlos, São Paulo.

AGNELLI, J. A. M. (2001). Informação Pessoal

BEZERRIL, P.J. (1999). Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos domiciliares no município de São Paulo. Em, Engenharia CET/SP, número 544/2001. P77-84.

CARVALHO, M.F. (1996). Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Revisão Bibliográfica de Doutorado. São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. V. 1. 88p.

CAZZUFFI, D., PUCCIO, M. and VENECIA, S. (1993). Essai de résistance à l'abrasion de membranes, feuilles et revêtements pour des ouvrages hydrauliques, C.R Colloque sur l'Étanchéité des Ouvrages Hydrauliques, Paris, February.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DE SÃO PAULO – (1993). Resíduos sólidos industriais. São Paulo.

DANIEL, E. D. (1995). Pollution prevention in landfills using engineers final cover. In: WASTE DISPOSAL BY LANDFILL – SYMPOSIUM GREEN93', Bolton, United Kingdom, 1993. Anais. v.3, p. 73-92.

DANIEL, E. D. (1996). Waste containment systems by geosynthetics. In: 2ND International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, 1996, Anais. V.3, p. 1275-1292.

ENGECORPS - Corpos de Engenheiros Consultores (1996). Rel: 064-SSO-NOD-B173. Estado da Arte dos Aterros sanitários – Parte II, 26/04/96 – São Paulo, 233p.

ENGLEMANN, B. (1996). Special Issue. First Germany/USA Geomembrane Workshop. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol 14. P. 652-657

EPA (1986). Method 9090. Compatibility Test for Waste and Membrane Liners. Test methods for Evaluating Solid Waste. Vol. 1A. Laboratory Manual, Physical/Chemical Methods. 3rd ed.

FROBEL, R. & RIGO, J.M. (1991). Puncture testing. Geomembrane: Identification and Performance Testing – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. ads., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain. p. 157-176.

GAMSKI, K. (1984). Geomembranes: classification use and performance. In: Geotextiles and Geomembranes, vol.1, no.2. p. 85-117.

GIROUD, J. P. & BEECH, J. (1989). Stability of soil layers on geosynthetics lining systems. In: Proceedings, Vol 1. Geosynthetics 89', San Diego, CA., USA. IFA. St. Paul, MN, p. 35-46.

GIROUD, J. P. (1995). Relationship between geomembranes density and carbon black content. In: Geosynthetics International. 1995. Vol 01. No.1

GIROUD, J. P. & TISINGER, L. G. (1995). Evaluation of PVC geomembranes shrinkage due to plasticizer loss. In: Geosynthetics International. 1995. Vol 02. No.6

GIROUD, J. P. & TISINGER, L. G. (1995). Relationship between PVC geomembranes density and plasticizer content. In: Geosynthetics International. 1995. Vol 02. No.3

HALSE, Y. H., RIGO, J. M. and WIERTZ, J. (1991). Chemical identification methods used to characterize polymeric geomembranes. Geomembrane: Identification and Performance Testing – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.

HAXO, H.E and PIERSON, P (1990). Permeability testing. (Chapter 10). Geomembrane: Identification and Performance Testing – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain, 1991. p.219-241.

HOEKSTRA, S. E. (1991). Burst testing. (1991). Geomembrane: Identification and Performance Testing – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain, 1991. p.135-157.

HUTTEN, A. (1996). Special Issue. First Germany/USA Geomembrane Workshop. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol 14.

INGOLD, T. S (1991). Friction testing, Geomembrane: Identification and Performance Testing – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain, 1991.

IPT. (1995) MANUAL DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DO LIXO MUNICIPAL (1995). 1ª Edição São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CEMPRE, 1995, 278p.

KOERNER, R.M. (1990) – Designing with Geosynthetics, 3rd ed. Prentice Hall Publ. Co., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

KOERNER, R.M. & HWU, B. (1991). Stability and Tension Consideration Regarding Cover Soils on Geomembranes Lined Slopes. Journal of Geotextiles and Geomembranes, Vol 10. P. 335-355.

KOERNER, R.M.; FAHMY R. W. (1995). Geosynthetics for geoenvironmental applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE THE GEOENVIRONMENT 2000, New York, 1995. *Anais*. ASCE Special Publication 46, p.872-898.

KOERNER, R.M. (1996). Special Issue. First Germany/USA Geomembrane Workshop. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol 14. P. 648-652

KOERNER, R.M. and EITH, A.W. (1998). Assessment of HDPE geomembrane performance in a municipal waste landfill double liner system after eight years of service. In: *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol 15. P. 277-287.

LOPES, M.L. e MONTEIRO, A.. V. (1999). Estudo da ação de agentes de degradação no comportamento à tração de geomembranas. Em: *Geotecnia* nº 87. Novembro

MANASSERO, M. (1997). Controlled landfill design. Report by CS4 of ISSMFE Technical Committee TC5, on 14th ICSMFE, Hamburgo, Alemanha.

MANASSERO, M; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. (1996). Waste disposal and containment. In: 2ND INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, Osaka, Japan, 1996. *Anais*. v.3, p. 1425- 1474.

MARQUES, A. M. (1998). Geossintéticos em geotecnia ambiental – II. In: *Curso Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente*.

MARQUES, A.C.M.; VILAR, O.M. (1999). *Aterros Sanitários – Caracterização, Comportamento Geomecânico e Técnicas*, Revisão Bibliográfica De Doutorado, USP / Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1999. P.177.

MARQUES, A.C.M. (2001). *Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos*. Tese de doutorada. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2001. P. 408.

MERRY, S. M. & BRAY, J.D. (1997). Temperature - dependent multi-axial creep response of HDPE geomembranes. In: *Geosynthetics '97*, San Diego, CA, EUA.

PEGGS, I. D. (1992). Whither PVC. PVC and HDPE geomembranes for municipal waste landfill liners and covers - The facts – Pennsylvania – USA.

PEGGS, I.D. & THIEL, R. (1998). Selecting Geomembrane Material. (1998). In: Sixth International Conference on Geosynthetics. 1998. p. 381-388.

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. Em: 2º Simpósio brasileiro sobre aplicações de geossintéticos, São Paulo, junho 1995.

RIGO, J. M. & CAZZUFFI, D. A. (1991) - Test Standarts and ther classification. p. 22-58., RILEM : Report of Technical Committee 103 – MGM – Mechanical an Hydraulic Testing of Geomembrane – Geomembrane: Identification and Performance Testing – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. ads., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.

ROLLIN, A. L, LAFLEUR, J., MARCOTTE, M.,DASCAL, and AKBER, Z (1984). Selection Criteria for the Use of Geomembranes in Dams and Dykes. In Northern Climate, Proc. Int. Conference on Geomembranes, Denver, June.

SHARMA, H.D.; LEWIS, S.P. (1994). *Waste containment System, waste stabilization and landfills: design and evaluation*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

SIMAL, A. L. (1992). Estrutura e Propriedades de Polímeros, DEMA, UFSCar, São Carlos, São Paulo.

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, E. C. (1991). STAFF INDUSTRIES. PVC - Geomembranes and Plasticizer Loss- the Real Truth.

TINGER, L.G. (1991). Chemical compatibility testing of geomembranes. In: *Geomembrane: Identification and Performance Testing* – Rollin, A. L. & Rigo, J. M. ads., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain.

TOMMAS, R. (1996). Special Issue. First Germany/USA Geomembrane Workshop. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol 14.

TSUBOI, M.; IMAIZUNMI, S.; MIYAJI, H.; (1998). *Effect of the temperature on tensile behavior of geomembranes*. In: Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, EUA, 1998, p.201-204.

UEATc (1982) apud RIGO & CAZZUFFI (1991). Union Européenne pour L'agrément Technique dans la Construction. Directives Générales UEATc pour l'Agremen des revetments d'Etanchéité de Toitures, Fasc. CSTB 1812.

VAN IMPE, W. F. & BOUAZZA, A. (1996). Densification os Domestic waste Fills by Dynamic Compaction. In: *Canadian Geotechnical Journal*, v.33, p.879-887.

VAN IMPE, W.F. (1998). Environmental Geotechnics: ITC5 activities – State of the art. In: *Proc. Of the Third International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006, p. 1163-1187.

VAN ZANTEN, R. V. (1986). *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*. A. A. Balkem – Rotterdam- Netherlands.

VIDAL, D.; GOURC, J.P.; PIERSON, P. (1994). Sistemas de Impermeabilização com Geossintéticos. X CONGRESSO BARSILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHRARIA DE FUNDAÇÃO, v. 3. Foz do Iguaçu, novembro, 1994, p.1011-1018.

VIDAL, D. (1998). Propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos geossintéticos. In: *Curso sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*.

WILLIAMS, N. D. & HOULIHAN, M. F. (1987). Evaluation of Interface friction properties between Geosynthetics an Soils. In: Proc. Geosynthetics 87, IFAI, New Orleans, pp. 616-627.

WOJNAROWICZ, M.; KNOCHENMUS, G; & VAN IMPE, W. (1998). Géotechnique de L'environnement – activités de l'ICSMFE (TC5). Revue Française de Géotechnique, n.83, p.3-16.