



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE GEOMEMBRANAS
UTILIZADAS NA IMPERMEABILIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS
DAS BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO**

LEANDRO SOUSA DOS SANTOS

Belo Horizonte, 06 de Junho de 2014

Leandro Sousa dos Santos

**ESTUDO DA DURABILIDADE DE GEOMEMBRANAS
UTILIZADAS NA IMPERMEABILIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS
DAS BARRAGENS DE REJEITO DE OURO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria das Graças Gardoni Almeida

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2014

Santos, Leandro Sousa dos.
S337s Estudo da durabilidade de geomembranas utilizadas na
impermeabilização de reservatórios das barragens de rejeito de ouro
[manuscrito] /Leandro Sousa dos Santos. - 2014.
xvi, 160 f., enc.: il.

Orientadora: Maria das Graças Gardoni Almeida.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f.132-137.

Bibliografia: f.138-160.

1. Mecânica do solo - Teses. 2. Barragens de regularização e reservatórios -
Teses. 3. Durabilidade (Engenharia) - Teses. 4. Ouro – Teses. I. Gardoni, Maria das
Graças A. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III.
Título.

CDU: 624.13(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



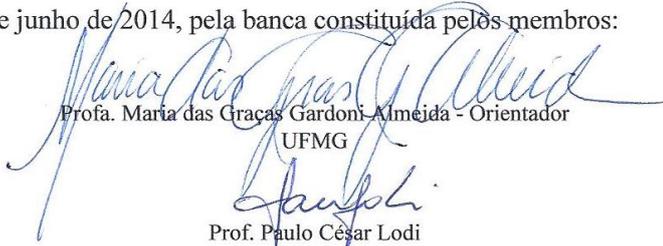
FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA DURABILIDADE DE GEOMEMBRANAS UTILIZADAS NA IMPERMEABILIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DAS BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE OURO

LEANDRO SOUSA DOS SANTOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 06 de junho de 2014, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Maria das Graças Gardoni-Almeida - Orientador
UFMG


Prof. Paulo César Lodi
UNESP


Prof. Lúcio Flávio de Souza Villar
UFMG

Belo Horizonte, 6 de junho de 2014.

DEDICATÓRIA

SONHO, palavra tão pequena, mas que remete a futuro.

FUTURO, algo imprevisível, desconhecido, incerto, mas que nos faz sonhar e buscar novas oportunidades.

OPORTUNIDADES que no início parecem distantes, no meio do caminho se tornam um fardo pesado (pressão, dedicação, esforço, tempo, renúncia e renúncia), mas no fim a recompensa de que sonhar vale a pena e que o futuro é hoje.

Não *DESISTA* dos seus sonhos, lute, persevere e se dedique a eles, e, jamais se esqueça de compartilhá-los com *DEUS* e com aqueles que irão lhe ajudar no decorrer da caminhada, porque sozinho não se alcança nada.

Por *Viviane Tavares*, participação especial de *João Vítor*. Baseado na história real de

Leandro S. Santos.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a Deus por me conceder graça, sabedoria, força e perseverança para prosseguir.

Agradeço a minha família por sempre me apoiar nessa jornada, minha mãe Wanda, minha irmã Clycia, meus cunhados e cunhada, meus sogros Afonso e Isa, e, em especial minha amada esposa Viviane e meu amado filho João Vitor pelo companheirismo, cumplicidade, amor e palavras de incentivo durante os momentos difíceis.

À Leme Engenharia pelo apoio e compreensão, a todos que contribuirão nesse trabalho, como: Olavo, Junio, Nathalia, Larissa, Oscar, Flavio, e em especial a amiga Ana Lucia, por mais uma vez me apoiar.

À Mineração Fazenda Brasileiro S.A, por permitir-nos a realizar o estudo, através de Jeã Lima e Rafael Jabour.

Aos parceiros Cesar Botelho e João Garcez que possibilitaram a realização da maior parte dos ensaios.

À minha orientadora Professora Maria das Graças Gardoni, pelo seu apoio incondicional, conselhos e direcionamento ao longo pesquisa.

Aos colegas da UFMG que fizeram parte desta jornada, Valéria, Alexandre, Matheus, Gustavo e Publio.

Aos companheiros Pedro Marques e Sergio Bruno pela dedicação e o apoio durante toda a pesquisa.

À Professora Maria Irene Yoshida do Departamento de Química da UFMG, pela contribuição nas análises Termogravimétricas e apoio durante a pesquisa.

Ao Hermano Nascimento pela grande contribuição nos ensaios de envelhecimento.

Ao Diogo Cruz pela grande contribuição nos ensaios de tração.

Aos fabricantes de geomembranas por fornecer-nos o material para a realização da pesquisa.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente para a realização desse trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações gerais	1
1.2	Objetivos da pesquisa	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Geomembranas poliméricas	4
2.1.1	Definição e classificação	4
2.1.2	Desempenho das geomembranas.....	6
2.2	Poliméricos	9
2.2.1	Materiais Poliméricos	9
2.2.2	Conceito de Polimerização	9
2.2.3	Peso Molecular	11
2.2.4	Classificação dos Polímeros	12
2.2.5	Cristalinidade em polímeros.....	14
2.2.6	Transição térmica dos polímeros.....	15
2.3	Fabricação das geomembranas	17
2.4	Ensaio em geomembranas.....	21
2.4.1	Espessura	23
2.4.2	Densidade ou Peso Específico.....	24
2.4.3	Massa por Unidade de Área.....	24
2.4.4	Resistência a Tração Simples (RTS)	24
2.4.5	Análise de Calorimetria Diferencial por Varredura (DSC).....	27
2.4.6	Análise Termogravimétrica (TGA)	28
2.4.7	Tempo de oxidação OIT (HDPE).....	30
2.4.8	Teor de Negro de Fumo (HDPE).....	31

2.4.9	Dispersão Negro de Fumo (HDPE)	32
2.4.10	Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)	32
2.4.11	Microscopia de Força Atômica (AFM)	33
2.5	Degradação de Geomembranas	36
2.5.1	Considerações gerais	36
2.5.2	Principais tipos de processos de degradação	37
2.5.2.1	Degradação Biológica.....	37
2.5.2.2	Degradação Ultravioleta (UV).....	37
2.5.2.3	Degradação Térmica	38
2.5.2.4	Degradação Química	39
2.5.2.5	Degradação Radioativa	42
2.5.2.6	Degradação por Oxidação.....	42
2.5.2.7	Degradação Hidrolítica	43
2.5.2.8	Efeitos sinérgicos	43
2.6	Vida útil das geomembranas.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	Materiais	49
3.1.1	Geomembranas	49
3.1.2	Fluido cianetado	52
3.1.3	Preparação das amostras	52
3.2	Descrição das áreas de estudo utilizadas	53
3.2.1	Introdução.....	53
3.2.2	Mineração Fazenda Brasileiro S.A.....	54
3.2.2.1	Processo produtivo.....	55
3.2.2.2	Descrição do Sistema de Disposição de Rejeitos	56
3.2.2.3	Descrição do Sistema de Impermeabilização dos Reservatórios.....	57
3.2.3	Barragem de rejeito Jacobina	65
3.3	Métodos adotados para os ensaios.....	66
3.3.1	Procedimento para a exumação de amostras	66
3.3.2	Envelhecimento em Câmara Úmida	71

3.3.3	Envelhecimento em ensaios de durabilidade.....	72
3.3.4	Equipamentos utilizados para os Ensaios físicos e mecânicos.....	74
3.3.5	Ensaio de tração.....	74
3.3.6	Determinação da espessura.....	76
3.3.7	Determinação da densidade.....	78
3.3.8	Análise Termogravimétrica (TGA).....	79
3.3.9	Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV).....	81
3.3.10	Microscopia de Força Atômica (AFM).....	82
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	84
4.1	Introdução.....	84
4.2	Resultados das Propriedades Físicas.....	84
4.3	Resultados dos Ensaios de Resistência a Tração Simples.....	87
4.3.1	Amostras Exumadas.....	88
4.3.2	Amostras Envelhecimento em Ensaio de Durabilidade.....	92
4.3.3	Amostras Envelhecidas em Câmara Úmida.....	98
4.3.4	Comparação entre os resultados obtidos para as amostras Exumadas, Envelhecidas em Câmara Úmida e Envelhecimento em ensaios de durabilidade.....	103
4.3.5	Resultados da Análise Termogravimétrica.....	107
4.3.6	Análise Microscopia Eletrônica por Varredura.....	111
4.3.7	Análise Força Atômica.....	121
4.4	Discussão dos resultados obtidos.....	124
4.4.1	Fabricante A - HDPE.....	124
4.4.2	Fabricante B - PVC.....	126
4.4.3	Fabricante C – PVC.....	126
4.4.4	Fabricante D - PVC.....	127
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	129
5.1	Considerações finais.....	129
5.1.1	Quanto aos equipamentos e Método utilizado.....	129

5.1.2 Comportamento das geomembranas.....	130
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	131
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
APÊNDICE A	138
APÊNDICE B	142
APÊNDICE C	152
APÊNDICE D	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Três métodos usados para manufatura de geomembranas (KOERNER, 2005).....	18
Figura 2-2 Processo de extrusão matriz plana - NORTENE (2013).....	19
Figura 2-3 Processo de extrusão matriz balão - NORTENE (2013).....	19
Figura 2-4 – Comportamento da tensão versus deformação para diversos tipos geomembranas (RIGO & CAZZUFFI, 2005).	25
Figura 2-5 – Corpo de prova em formato de halteres de acordo com a ASTM 638: LO varia de 60 a 150mm e W varia de 2,5 a 10mm. (ASTM, 638-2010)	26
Figura 2.6 – Ensaio de tração em geomembrana de HDPE	27
Figura 2.7 – Curvas de DSC para poliéster (Adaptado de KORNER, 2005)	28
Figura 2-8 - Exemplo de curva de perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de HDPE, 1,50mm (LODI, 2003).....	29
Figura 2-9 - Exemplo de curva de perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de PVC, 1,0mm (LODI, 2003)	29
Figura 2-10 – Exemplo dos Parâmetros obtidos do ensaio de TGA para amostra de PVC (COLMANETTI, 2006).....	30
Figura 2.11 – Curva típica de OIT (Adaptado de KOERNER, 2005)	31
Figura 2.12 – Diagrama de funcionamento do microscópio de varredura de força atômica, (FILHO, 2003)	34
Figura 2.13 – Microscopia eletrônica de varredura de um cantiléver de nitreto de silício com agulha acoplada (HERRMANN, 1997).....	35
Figura 2.14 – Perfil superficial estabelecido como função (F(X)) da distância (L), como expresso pela equação (3) (FILHO, 1998).....	36
Figura 3-1 - Esquema dos grupos de estudo	50
Figura 3-2 – Armazenamento do fluído do Lago III em containers no Laboratório da UFMG.	52
Figura 3.3 - Localização da Mineração Fazenda Brasileiro.....	54
Figura 3.4 - Esquema do Processo Produtivo	55
Figura 3.5 - Sistema de Disposição de Rejeitos MFB	56
Figura 3-6 - Seção típica do Dique II – Impermeabilização a montante e fundação com GM PVC 0,80mm	58
Figura 3-7 - Seção típica do Lago III – Impermeabilização a montante com GM PVC 0,80mm	58
Figura 3-8 – Detalhe de sobreposição de geomembrana existente com nova a ser instalada.....	58
Figura 3-9 – Lago II – Vista do reservatório e espaldares revestidos com GM de PVC.....	59
Figura 3-10 – Lago II – Vista do reservatório e espaldares revestidos com GM de PVC.....	59

Figura 3-11 – Vista do Lago II desde o Dique II	60
Figura 3-12 – Lago II - Espaldares revestidos com GM de PVC	60
Figura 3-13 – Lago II – Exumação da amostra de GM de PVC	61
Figura 3-14 – Dique de segurança – Instalação da geomembrana de HDPE	61
Figura 3-15 – Dique de segurança – Vista HDPE em operação – Ao fundo percebe-se o percolado de cianeto proveniente dos drenos do Lago II	62
Figura 3-16 – Dique de segurança – Exumação de amostra –Nota-se a saída do percolado de cianeto dos drenos de fundo do Lago II	62
Figura 3-17 – Lago III – Detalhe da colocação da GM de PVC sobre o talude	63
Figura 3-18 – Lago III – Detalhe da ancoragem provisória para instalação (GM de PVC)	63
Figura 3-19 – Lago III – Acabamento do talude antes da colocação da GM de PVC	64
Figura 3-20 – Lago III – Vista da GM de PVC instalada	64
Figura 3-21 – Vista da barragem B1 e da barragem Nova (GOOGLE EARTH, 2008 apud SAMPAIO 2013).	65
Figura 3-22 – Vista geral da barragem de Jacobina 1ª etapa (DAM, 2010 apud SAMPAIO, 2013).	66
Figura 3-23 – Local da exumação das amostras	68
Figura 3-24 – Dique de segurança – Local da exumação das amostras de HDPE	68
Figura 3-25 – Dique de segurança – Exumação da amostra de HDPE.....	69
Figura 3-26 – Lago II – Vista do reservatório (Lago II).....	69
Figura 3-27 – Lago II – Exumação da amostra de PVC – Amostra GMEX-D	70
Figura 3-28 – Lago III – Exumação da amostra de PVC – GMEX-B e GMEX-C	70
Figura 3-29 – Lago II – Exumação amostra de PVC.....	71
Figura 3-30 - Vista geral da câmara úmida – Fabricante Corrotest CE300.....	72
Figura 3-31 – Caixa para imersão das amostras	73
Figura 3-32–Imersão das amostras no fluído cianetado para ensaios de durabilidade.	74
Figura 3-33 – Prensa tração do fabricante EMIC	75
Figura 3-34 – Prensa tração do fabricante INSTRON	75
Figura 3-35 – Equipamento para medição de espessura de geomembrana lisa (GARDONI, 2013).	76
Figura 3-36 – Equipamento para medição da espessura de geomembrana texturizada nas duas faces, segundo a ASTM D5994.....	77
Figura 3-37 – Detalhe da medição da espessura do núcleo de geomembrana texturizada em uma face (GARDONI, 2013).....	78
Figura 3-38 – Balança para determinação da densidade.....	78
Figura 3-39 - Equipamento de termogravimetria e computador para aquisição dos dados.....	80

Figura 3-40 - Equipamento de termogravimetria.....	80
Figura 3-41–Detalhe do forno e cadinho	80
Figura 3-42 – Vista geral do equipamento MEV	81
Figura 3-43 – Câmara da amostra com mesa para fixação dos suportes metálicos.....	81
Figura 3-44 – Amostras metalizadas com ouro	82
Figura 3-45 – Microscópico de Força Atômica – Modelo ASYLUM RESEARCH - MFP-3D-SA .	82
Figura 3-46 – Computador para aquisição dos dados	83
Figura 3-47 – Análise em andamento	83
Figura 4.1 – Espessura GM de HDPE – Virgens e Exumadas	84
Figura 4.2 – Espessura GM de PVC - Virgens e Exumadas.....	85
Figura 4.3 – Espessura GM de HDPE - antes e depois ensaio de durabilidade.....	85
Figura 4.4 – Espessura GM de PVC - antes e depois do ensaio de durabilidade.	85
Figura 4.5 – Densidade GM de HDPE – Virgens e Exumadas.....	86
Figura 4.6 – Densidade GM de PVC – Virgens e Exumadas	86
Figura 4.7 – Densidade GM de HDPE - antes do processo de envelhecimento em ensaio de durabilidade.....	87
Figura 4.8 – Densidade GM de PVC - antes do processo de envelhecimento em ensaio de durabilidade.....	87
Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante A (HDPE)	89
Figura 4.10 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante B (PVC).....	90
Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante C (PVC).....	91
Figura 4.12 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante D (PVC).....	92
Figura 4-13 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante A (HDPE)	94
Figura 4.14 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante B (PVC) ...	95
Figura 4-15 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante C (PVC) ...	96
Figura 4-16 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante D (PVC)...	97
Figura 4.17 – Resultados ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante A (HDPE).....	99
Figura 4.18 – Resultados ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante B (PVC)	100
Figura 4.19 – Resultados ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante C (PVC)	101
Figura 4.20 – Resultados dos ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante D (PVC)	102

Figura 4.21 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante A (HDPE).....	104
Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante B (PVC).....	105
Figura 4.23 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante C (PVC).....	106
Figura 4.24 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante D (PVC).....	107
Figura 4-25 – Resultado TGA para amostras de HDPE – Fabricante A.....	108
Figura 4-26 – Resultado TGA para amostras de PVC – Fabricante B	109
Figura 4-27 – Resultado TGA para amostras de PVC – Fabricante C	110
Figura 4-28 – Resultado TGA para amostras de PVC – Fabricante D	111
Figura 4.29 – Superfície GMV-A (aumento de 30 vezes)	112
Figura 4.30 – Superfície GMEX-A1 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)	112
Figura 4.31 – Superfície GMEX-A2 (aumento de 30 e 5000 vezes, respectivamente).....	112
Figura 4.32 – Superfície GMEX-A3 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).	113
Figura 4.33 – Superfície GMD-A-R1 (aumentos de 30 e 5000 vezes, respectivamente).....	113
Figura 4.34 – Superfície GMD-A-R4 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	113
Figura 4.35 – Superfície GME-A-500h (aumentos de 30 e 5000 vezes, respectivamente).....	114
Figura 4.36 – Superfície GME-A-3000h (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	114
Figura 4.37 – Superfície GMV-B (aumento 30 vezes)	115
Figura 4.38 – Superfície GMEX-B (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)	115
Figura 4.39 – Superfície GMD-B-R1 (aumentos 30 e 1000 vezes, respectivamente).....	115
Figura 4.40 – Superfície GMD-B-R4 (aumentos 30 e 5000 vezes, respectivamente).....	116
Figura 4.41 – Superfície GME-B-500h (aumento 30 e 1000 vezes, respectivamente)	116
Figura 4.42 – Superfície GME-B-3000h (aumentos 30 e 1000 vezes respectivamente).....	116
Figura 4.43 – Superfície GMV-C (aumento 30 vezes)	117
Figura 4.44 – Superfície GMEX-C (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)	117
Figura 4.45 – Superfície GMD-C-R1 (aumento 30 e 10000 vezes, respectivamente)	118
Figura 4.46 – Superfície GMD-C-R4 (aumento 30 e 5000 vezes, respectivamente)	118
Figura 4.47 – Superfície GME-C-500h (aumentos 30 e 1000 vezes respectivamente).....	118
Figura 4.48 – Superfície GME-C-3000h (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	119
Figura 4.49 – Superfície GMV-D (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	119
Figura 4.50 – Superfície GMEX-D (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)	120
Figura 4.51 – Superfície GMD-D-R1 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	120
Figura 4.52 – Superfície GMD-D-R4 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	120
Figura 4.53 – Superfície GME-D-500h (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).....	121
Figura 4.54 – Superfície GME-D-3000h (aumentos 30 e 1000 vezes respectivamente).....	121

Figura 4-55 – Superfície tridimensional das geomembranas – Varredura 10 μ m	122
Figura 4-56 – Superfície tridimensional das geomembranas – Varredura 10 μ m	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tipos de polímeros (Adaptado de Rowe, 2002).	5
Tabela 2-2 - Principais Tipos de Geomembrana em uso (Adaptado Koerner, 2005).....	6
Tabela 2-3 - Vantagens e desvantagens das geomembranas (BAGCHI APUD LODI, 2003)	6
Tabela 2-4 – Algumas propriedades das geomembranas HDPE lisas (GRI GM13, 2012)	8
Tabela 2-5 – Algumas das propriedades das geomembranas HDPE texturizadas (GRI GM13, 2012)	8
Tabela 2-6 – Algumas das propriedades das geomembranas PVC (ASTM D7176-6).....	8
Tabela 2-7 - Repetição unidade molecular de polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos (Adaptado de Koerner, 2005).....	14
Tabela 2-8 – Temperatura de transição de polímeros (Adaptado de Koerner, 2005).....	16
Tabela 2-9 - Geossintéticos Poliméricos comumente usados e suas formulações aproximadas (Adaptado de Koerner, 2005).....	17
Tabela 2-10 – Ensaio em geomembranas	23
Tabela 3-1 – Especificação das geomembranas usadas na pesquisa.	49
Tabela 3-2 – Tipos, fabricantes e nomenclaturas usadas para a identificação das geomembranas e respectivos locais de aplicação.	49
Tabela 3-3 – Nomenclaturas usadas para a identificação dos grupos de amostras	50
Tabela 3-4 – Características básicas das geomembranas exumadas.....	50
Tabela 3-5 – Descrição e quantidade de ensaios realizados	51
Tabela 3-6 - Processos de envelhecimento e períodos de análise.....	52
Tabela 3-7 - Local de extração das amostras nas barragens.	67
Tabela 4-1 – Resultados ensaio TGA (HDPE) – Perdas de massa	107
Tabela 4-2 – Resultados ensaio TGA (PVC) – Perdas de massa e composição – Amostra B	108
Tabela 4-3 – Resultados ensaio TGA (PVC) – Perdas de massa e composição – Amostra C	109
Tabela 4-4 – Resultados ensaio TGA (PVC) – Perdas de massa e composição – Amostra D	110
Tabela 4.5 – Resultado das rugosidades da amostra HDPE	122
Tabela 4-6 – Resultado das rugosidades da amostra PVC.....	123
Tabela 4-7 – Propriedades mecânicas GM faixa larga – Korner (2005)	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Terpolímero de acrilonitrila – butadieno - estireno
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CPE	Poli (etileno clorado)
CSPE	Poli (Etileno Clorossulfonado)
CSPE-R	Poli (Etileno Clorossulfonado Reforçado)
DIN	<i>German Institute for Standardization</i>
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
EVA	Copolímero de etileno – acetato de vinila
GM	Geomembrana
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
HIPS	Poliestireno de alto impacto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LDPE	Polietileno de Densidade Linear
LLDPE	Polietileno Linear de Baixa Densidade
MDPE	Polietileno de Densidade Média
MEV	Microscopia Eletrônica por Varredura
MI	Índice de fluidez
n	Grau de polimerização
PBT	Poli (tereftalato de butileno)
PC	Policarbonato
PECS (CSPE)	Poli (etileno clorossulfonado)
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
RTS	Resistencia a tração simples
SBR	Copolímero Debutadieno – estireno ou borracha
SVT	Transmissividade aos Vapores de Solventes

TGA	Análise Termogravimétrica
TMA	Análise termomecânica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UTM	Unidade Transversa de Mercator
WVT	Permeabilidade ao Vapor de Água
OIT	Tempo de oxidação
EPA	Agência de Proteção Ambiental EUA
EUA	Estados Unidos da América

RESUMO

No presente estudo, avaliou-se o comportamento da degradação de geomembranas (GM) de Polietileno de Alta Densidade (HDPE) e Policloreto de Vinila (PVC), que foram utilizadas para impermeabilização dos reservatórios dos diques de rejeito de Mineradora de ouro, localizada no estado da Bahia, região nordeste do Brasil. O ouro é o metal extraído na mina, cujo processo de beneficiamento empregado para a separação dos resíduos minerais utiliza uma série de operações físico-químicas. Após todo o processo de beneficiamento ocorre a deposição do rejeito no dique, cuja fundação e espaldares são impermeabilizados com geomembranas.

As geomembranas de HDPE e PVC utilizadas neste trabalho possuíam espessuras de 1,5 e 0,8 mm, respectivamente, e foram instaladas no período de 2006 a 2011. Na referida pesquisa foram realizados ensaios em amostras virgens e amostras exumadas na obra, possibilitando a comparação da durabilidade nas duas situações e, conseqüentemente, comparar o grau de degradação das geomembranas na obra. Durante o estudo foram também realizados ensaios em laboratório para envelhecimento das geomembranas sob as mesmas condições encontradas em campo e ensaios em câmara úmida para aceleração do envelhecimento dos polímeros. Para os ensaios de laboratório as amostras foram imersas no fluido da barragem sob temperatura e radiação U.V similares às encontradas na barragem. Foram ainda realizados ensaios de propriedades físicas nas geomembranas (espessura, gramatura e densidade), análise termogravimétrica, ensaios de tração e análises por meio de microscopia eletrônica de varredura das geomembranas virgens, das amostras retiradas dos ensaios de laboratório, câmara úmida e das exumadas em obra.

De posse dos resultados das análises, foi possível concluir que as geomembranas exumadas de PVC e de HDPE apresentaram tendência de diminuição da deformabilidade e aumento da rigidez, apresentando certo grau de degradação. A GM de PVC, no entanto, apresentou um comportamento mais pronunciado nesse sentido. Algumas amostras de PVC apresentaram também redução de massa após a imersão no fluido contendo cianeto, no entanto para alguns processos de envelhecimento algumas amostras apresentaram-se mais dúcteis.

Palavras Chave: (geomembrana, durabilidade, envelhecimento, barragem de rejeito, ouro)

ABSTRACT

This work presents the evaluation of the High Density Polyethylene (HDPE) and Polyvinyl Chloride (PVC) geomembranes (GM), after exposure in waterproofing of reservoirs of the tailing dams of the gold mining company, located in the state of Bahia, northeast region of Brazil. The gold is the metal mined, which beneficiation process used for its separation of the mineral waste uses a set of physical and chemical operations. After all the beneficiation process the tailings deposition occurs in the dam, which foundation and slopes are waterproofing with geomembranes.

The HDPE and PVC geomembranes used in this study have 1.5 and 0.8 mm thick, respectively, and were installed in field from 2006 to 2011. In this referred research, tests were performed on fresh geomembrane samples and samples directly exhumed from dams, allowing the comparison of the durability in both cases and thus conclude about the degree of aging of the geomembranes applied. Laboratory tests were carried out in order to aging the geomembranes under the same field conditions. Tests in weathering chamber for accelerate the process of aging the polymers were also performed. Regarding the laboratory tests the geomembranes were immersed in the dam fluid, also simulating the similar conditions, of temperature and exposure to UV rays, as were found in the dam. Tests of physical properties of the geomembranes (thickness, weight and density), thermogravimetric analysis, tensile tests and scanning electron microscopy of fresh geomembranes samples, of the samples obtained from the laboratory tests, from the weathering chamber and from samples directly exhumed from dams were also performed.

The results of the analyses showed that the exhumed PVC and HDPE geomembranes presented a tendency of decreasing in deformability and increasing in stiffness, and presented some degree of degradation. The GM of PVC, however, showed a pronounced behavior in this sense. Some PVC samples also presented decreasing of weight after immersion in cyanide-containing fluid; however for some aging processes some samples were more ductile.

Key words: (geomembrane, durability, ageing, gold, tailing dam)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Com o uso crescente de geomembranas em sistemas de barreira para aterros sanitários e outras aplicações de contenção, tem havido uma crescente necessidade de abordar o seu desempenho e eficácia a longo prazo para proteger o lençol freático de contaminação. Existem algumas evidências de campo que sugerem que estes materiais à base de polímero podem sofrer alterações das suas propriedades com o tempo (SANGAM & ROWE, 2001).

Segundo Landreth (1990), o uso de geomembrana inclui o revestimento, cobertura de instalações de armazenamento de líquidos, tratamento de resíduos sólidos e perigosos, armazenamento e as instalações de descarte. O governo dos EUA estabeleceu leis que proíbem a migração de líquidos a partir dessas instalações nos sistemas de água. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) determinou que as geomembranas constituem a maneira mais prática de minimizar liberação de poluentes a partir de instalações de resíduos perigosos. Além disso, as geomembranas são recomendadas para aterros de resíduos sólidos urbanos, devido à impossibilidade de controlar o recebimento de resíduos perigosos a partir de resíduos municipais.

Sandroni et al., (2010) destacam as rigorosas normas ambientais publicadas nos últimos anos, que têm chamado a atenção para a correta disposição de todo o tipo de resíduos, especialmente os resíduos sólidos domésticos. Em detrimento ao lixão utilizado por muitas décadas como opção de descarte de resíduos estão sendo utilizados os aterros sanitários, que são estruturas de engenharia que abrange muitos processos como: sistemas de “*liner*” e cobertura incluindo sistemas de coleta de gases e de chorume.

A utilização de geossintéticos, em particular, as geomembranas em barragens, em complemento ou substituição de materiais convencionais como a argila e silte, concreto, ou concreto betuminoso, fora consequência, dentre outras considerações, da utilização exitosa de geomembranas em canais e reservatórios. A credibilidade dos materiais sintéticos em barragens tem sido fundamentada no bom desempenho das barreiras de PVC incorporadas em um grande número de barragens de concreto em diversas partes do mundo, (CAZZUFFI ET AL. 2010).

A utilização dos geossintéticos em obras de infraestrutura como estradas, ferrovias, portos, obras de saneamento, barragens e etc, tem sido ampliada nas últimas décadas em função de sua

praticidade e evolução tecnológica destes materiais sintéticos. Dentre os diversos tipos de composição mais comuns de geomembranas destaca-se o HDPE (Polietileno de Alta Densidade), PVC (Policloreto de Vinila), LDPE (Polietileno de Densidade Linear), LLDPE (Polietileno Linear de Baixa Densidade), dentre outros.

De um modo geral, a degradação do polímero é principalmente causada pela ruptura das ligações químicas em macromoléculas. É útil, por conseguinte, subdividir os diferentes modos de degradação do polímero de acordo com os diferentes modos de iniciação, ou seja, térmica, mecânica, fotoquímicos, química e biológica. (GAMSKI, 1984).

Segundo Matheus (2002), a degradação de materiais poliméricos pode ser entendida como qualquer reação química destrutiva, que pode ser causada por agentes físicos e/ou químicos. Essa degradação causa uma modificação nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciado pela deterioração progressiva de suas propriedades. Os agentes de degradação física podem ser: radiação solar e outras radiações, temperatura e dano mecânico. Quanto aos agentes químicos pode-se citar: os ácidos, bases, solventes, dentre outros.

Devido a esta variedade de composição, é importante avaliar as propriedades mecânicas, físicas e químicas das mesmas quando submetidas às solicitações de campo. Estas propriedades devem ser determinadas a partir de ensaios de laboratório ou de campo, visando reproduzir as condições de interação do geossintético com o meio em que será inserido.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o processo de degradação das geomembranas de HDPE e PVC instaladas nos diques e barragens de rejeito de ouro.

1.2.2 Objetivos Específicos

A seguir descrevem-se os objetivos específicos da pesquisa:

- Avaliar o processo de degradação em laboratório;
- Avaliar o processo de degradação em campo para exumação;
- Avaliar o processo de degradação em câmara úmida.

1.3 Organização da dissertação

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, descritos sucintamente a seguir:

O capítulo 1 faz uma introdução e apresentação geral da dissertação. São descritos os objetivos e as justificativas da pesquisa, além de apresentar a estruturação geral do trabalho.

O capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica sobre geomembranas incluindo a sua composição, principais características, fabricação bem como os principais processos de degradação.

No capítulo 3 são apresentados os equipamentos desenvolvidos, uma descrição dos materiais utilizados na pesquisa e os métodos aplicados para o desenvolvimento do trabalho abrangendo os ensaios de laboratório, exumações em campo e as características gerais do sistema de disposição de rejeitos da Mineração Fazenda Brasileiro S/A.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para os ensaios mecânicos, físicos e térmicos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geomembranas poliméricas

2.1.1 Definição e classificação

De acordo com a ASTM D4439 (2014), geossintético é um produto planar fabricado a partir de um material polimérico, que pode ser usado com solo, rocha ou outro material relacionado com a engenharia geotécnica como parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema. Sendo a geomembrana um tipo de geossintético essencialmente impermeável composto por uma ou mais folhas sintéticas. Segundo Costa et al.(2008), as geomembranas são membranas compostas predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, cuja principal função é atuar como barreira para líquidos ou vapores.

Koerner (2005) define a geomembrana como folhas poliméricas fabricadas de forma contínua, também podem ser fabricadas de impregnação de geotêxtilis com asfalto, sprays elastoméricos ou ainda com geocomposto betuminoso. Tendo como principal função a barreira para contaminantes líquidos e gases. As geomembranas não são completamente impermeáveis, sua permeabilidade está entre 1×10^{-12} a 1×10^{-15} m/s sendo essa permeabilidade medida através do ensaio de transmissão de vapor d'água.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na norma NBR 12553 (ABNT, 2003) define a geomembrana como um produto bidimensional, de baixa permeabilidade, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação. A geomembrana é chamada “reforçada” (GMR) quando há uma armadura de reforço incorporada ao produto, formando uma estrutura monolítica. A geomembrana texturizada (GMT) é aquela com acabamento superficial rugoso com a função de aumentar as características de atrito de interface.

Rowe (2002) descreve os diversos tipos de geomembranas incluindo: Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno Clorado (CPE), Polietileno Clorossulfonado (CSPE), Borracha de Etileno Propileno (EPDM), Polipropileno (PP), Polietileno de Baixa Densidade Linear (LLDPE), Polietileno de Média Densidade (MDPE). Ainda ressalta que as geomembranas ditas de alta densidade (HDPE) são na realidade de media densidade (MDPE), mas devido à adição de negro de fumo a geomembrana fica

dentro do limite especificado pela ASTM D883 como de alta densidade (HDPE). A seguir apresenta-se o período em que foram desenvolvidos os principais tipos de geomembranas:

Tabela 2-1 – Tipos de polímeros (Adaptado de Rowe, 2002).

Tipos de Polímeros	Ano
Policloreto de Vinila (PVC)	1927
Polietileno de Alta Densidade (HDPE)	1941
Poliéster (PET)	1950
Poliestireno expandido	1950
Polietileno Linear de Baixa Densidade (LLDPE)	1956
Polipropileno (PP)	1957
Borracha de Etileno Propileno (EPDM)	1960
Polietileno Clorossulfonado (CSPE)	1965

O “*U.S Bureau of Reclamation*” em 1950, realizou uma pesquisa em parceria com um fabricante de resina, sobre revestimentos de canais de água com geomembrana PVC. O PVC foi instalado em grande número de canais no Canadá, Rússia, Tailândia e na Europa, durante os anos de 1960 e 1970. As geomembranas de Polietileno foram desenvolvidas no oeste da Alemanha e apresentada em toda a Europa, Ásia, Austrália e America do Norte (KOERNER, 2005).

O Brasil apresenta diversas obras que incorporam os materiais geossintéticos, em particular, as geomembranas. O uso desses materiais data do início da década de 1970 sendo em sua maioria obras ambientais para armazenamento ou contenção de resíduos onde a geomembrana protege a fundação, encostas e aquíferos contra contaminação (aterros sanitários e industriais, revestimentos de fundo, impermeabilização de canais, etc.). As geomembranas de HDPE e PVC são as mais utilizadas para tais finalidades.

De acordo com Vilar (2004), a maioria dos geossintéticos encontra aplicação em obras de proteção ambiental, sendo o Sistema de Contenção de Resíduos Sólidos (SCRS) o mais completo e complexo tipo de obra de proteção ambiental. A tabela a seguir apresenta os principais tipos de geomembranas existentes.

Tabela 2-2 - Principais Tipos de Geomembrana em uso (Adaptado Koerner, 2005)

Amplamente utilizado	Menos utilizado
Polietileno de Alta Densidade (HDPE)	Polietileno Clorossulfonado: Reforçado (CSPE-R)
Polietileno Linear de Baixa Densidade (LLDPE)	Borracha de Etileno Propileno (EPDM) e reforçado (EPDM-R)
Policloreto de Vinila (PVC)	Polipropileno Flexível: não reforçado (fPP) e reforçado (fPP-R)
	Liga do Interpolímero Etileno: Reforçado (EIA-R)

2.1.2 Desempenho das geomembranas

A avaliação das características e desempenho das geomembranas é requerida para uma adequada seleção do produto a ser utilizado em cada tipo de obra. As vantagens e desvantagens de cada tipo de geomembrana estão relacionadas no Tabela 2-3 sendo apresentado o comparativo entre algumas das principais geomembranas fabricadas.

Tabela 2-3 - Vantagens e desvantagens das geomembranas (BAGCHI APUD LODI, 2003)

Vantagens	Desvantagens
A) GEOMEMBRANAS ELASTOMERICAS	
Borracha de Etileno Propileno (EPDM) Boa resistência às intempéries Boa resistência a baixas temperaturas Fácil emenda - termofusão	Razoável em altas temperaturas Razoável resistência química
Butílica, Butílica/ EPDM, EPDM - Borrachas Curadas Razoável resistência às intempéries Baixa permeabilidade para gases Boa resistência a altas temperaturas	Más emendas de campo Painéis Pequenos Razoável resistência química
Cloropreno (Neoprene) – Borracha Curada Boa resistência às intempéries Boa resistência a altas temperaturas Boa resistência química	Emenda razoável de campo – Solvente e fita adesiva Emenda de campo razoável para superfície externa
B) GEOMEMBRANAS TERMOPLASTICAS AMORFAS	
Policloreto de Vinila (PVC) Resistente mesmo sem reforço Leve em uma única camada Fácil emenda – dielétrica, solvente e termofusão. O desempenho as altas temperaturas deve ser verificado Grande variação de espessura Grande variação nas composições	Lixivia de plastificantes ao longo do tempo Em baixa temperatura as trincas devem ser verificadas Resistencia química deve ser verificada

Vantagens	Desvantagens
Clorado de Polietileno (CPE) Boa resistência às intempéries Fácil emenda – dielétrica e solvente Boa resistência química Boa resistência às trincas baixa temperatura	Recuperação de emendas Possível delaminação
Clorossulfonado Polietileno CSPE Excelente resistência às intempéries Boa resistência às trincas baixa temperatura Boa resistência química Fácil emenda – adesiva e termofusão	Razoável em altas temperaturas
C) GEOEMEMBRANAS TERMOPLASTICAS SEMICRISTALINAS	
Polietileno de Alta e Media densidade (HDPE e MDPE) Excelente resistência química Fácil emenda – térmica e extrusão Grande variação de espessura	Baixo atrito na superfície Sensibilidade ao tensofissuramento Difícil acabamento nas emendas Variação térmica expansão/contração
Polietileno de Baixa e Muito baixa densidade (LLDPE e VLDPE) Boa resistência química Fácil emenda – térmica e extrusão Grande variação de espessura Sem tensofissuramento	Com moderada variação térmica expansão/contração LDPE Raramente é utilizado Resistencia química deve ser verificada
Polietileno Linear de Baixa Densidade (LLDPE) Fácil emenda – térmica e extrusão Grande variação de espessura Alto atrito na superfície Sem tensofissuramento	Resistencia química deve ser verificada
D) POLIMERO/BETUMEM E GEOMEMBRNAS BETUMINOSAS	
Grande variação na manufatura Boa conformação com a fundação Facilmente reforçado Possível auto cicatrização	Resistencia química deve ser verificada Recuperação de emendas deve ser verificada

As geomembranas de PE possuem especificações próprias ditadas pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI, 2012). Na Tabela 2-4 são apresentadas algumas das propriedades especificadas pela norma GRI GM-13 para geomembranas de HDPE lisas e na

Tabela 2-5 geomembranas HDPE texturizadas. Pode-se observar que, além da influência direta na superfície das geomembranas, as texturas modificam também algumas das propriedades desses materiais. Notam-se diferenças significativas na resistência à tração e à deformação axial nas rupturas, sendo essas maiores para as geomembranas lisas. Além disso, o funcionamento também apresenta diminuição para as geomembranas texturizadas.

Tabela 2-4 – Algumas propriedades das geomembranas HDPE lisas (GRI GM13, 2012)

Propriedades	Método Teste (ASTM)	Espessuras (mm)						
		0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3
Resistencia a tração (kN/m)	D6693 Tipo IV							
No escoamento		11	15	18	22	29	37	44
Na ruptura		20	27	33	40	53	67	80
Deformação axial (%)								
No escoamento		12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
Na ruptura		700%	700%	700%	700%	700%	700%	700%
Resistencia ao rasgo (N)	D1004	93	125	156	187	249	311	374
Puncionamento (N)	D4833	240	320	400	480	640	800	960
Tensofissuramento (h) (<i>stress-crack</i>)	D5397	300	300	300	300	300	300	300

Tabela 2-5 – Algumas das propriedades das geomembranas HDPE texturizadas (GRI GM13, 2012)

Propriedades	Método Teste (ASTM)	Espessuras (mm)						
		0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3
Resistencia a tração (kN/m)	D6693 Tipo IV							
No escoamento		11	15	18	22	29	37	44
Na ruptura		8	10	13	16	21	26	32
Deformação axial (%)								
No escoamento		12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
Na ruptura		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Resistencia ao rasgo (N)	D1004	93	125	156	187	249	311	374
Puncionamento (N)	D4833	200	267	333	400	534	667	800
Tensofissuramento (h) (<i>stress-crack</i>)	D5397	300	300	300	300	300	300	300

As propriedades das geomembranas de PVC são apresentadas pelo *PVC Geomembrane Institute* (PGI-1104 - 2004), que também são apresentadas na norma ASTM D7176-6. Na Tabela 2-6 são apresentadas as prescrições consideradas de referência em diversos países, inclusive no Brasil.

Tabela 2-6 – Algumas das propriedades das geomembranas PVC (ASTM D7176-6)

Propriedades	Método Teste (ASTM)	Espessuras (mm)					
		0,25 ±0,013	0,51 ±0,03	0,76 ±0,04	1,02 ±0,05	1,27 ±0,06	1,52 ±0,06
Força (kN/m)	D882						
na ruptura		4,2	8,4	12,8	17	20,3	24
Deformação axial (%)							
na ruptura		250	360	380	430	430	450
Modulo 100% deformação (kN/m)		1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8
Resistencia ao rasgo (N)	D1004	11	27	35	44	58	67

2.2 Poliméricos

O estudo das propriedades das geomembranas requer algumas considerações acerca de suas principais matérias-primas, os polímeros. A seguir são apresentados alguns conceitos básicos referentes ao comportamento, tipos e propriedades dos principais polímeros utilizados na fabricação das geomembranas bem como os principais processos degradativos que possam vir a ocorrer e principais ensaios.

2.2.1 Materiais Poliméricos

Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os polímeros naturais, ou seja, aqueles que encontramos na natureza possuem estrutura mais complexa que os sintéticos. Para os polímeros naturais podemos citar as proteínas, polissacarídeos, elastômeros (látex obtidos a partir da extração da seringueira). Os polímeros sintéticos são aqueles obtidos por processo industrial, em geral, a partir de moléculas de baixo peso molecular. O polímero é uma molécula grande, que possui alto peso molecular que é originado pela repetição de pequenas estruturas denominadas monômeros (do grego *monos* = um) que são unidas umas as outras por ligações covalentes ao longo da cadeia. A palavra *Poli* originada do grego significa muitas, e *mero* significa partes (ELIZABETE *et al*, 2001).

Segundo Lopes (2010), os materiais mais utilizados na fabricação de geossintéticos são materiais orgânicos poliméricos sintéticos obtidos a partir do petróleo, designados por plásticos. Os plásticos podem ser divididos em dois grupos: os termoplásticos, que podem amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento e, os plásticos termo fixos, que endurecem após moldagem, não podendo voltar a ser fundidos por ação do calor.

2.2.2 Conceito de Polimerização

A polimerização consiste na união de moléculas de um dado composto (monômero) para formar um novo composto designado de polímero, cujo peso molecular é um múltiplo inteiro do produto de partida. Este tipo de reação, que constitui uma das três formas mais importantes de formação de macromoléculas, dá-se geralmente entre compostos com ligações duplas e o seu início requer a presença de um íon (polimerização iônica) ou de um radical (polimerização radicalar). Os radicais iniciadores podem ser derivados de peróxidos orgânicos ou inorgânicos, compostos azóicos ou outros produtos capazes de gerar radicais livres. Na escala técnica, a polimerização realiza-se de uma forma contínua ou descontínua. A polimerização em bloco ou em massa realiza-se sem diluente e o polímero

que se forma encontra-se dissolvido no próprio monômero, através deste processo obtém-se, por exemplo, o poliestireno.

A polimerização em solução realiza-se na presença de um solvente, como por exemplo, o etilbenzeno ou a água. É este método que se utiliza para a obtenção da borracha butílica. A polimerização em suspensão tem lugar com uma suspensão aquosa de glóbulos do monômero (pérolas), em presença de um dispersante. Por este sistema obtém-se, por exemplo, o poliacetato de vinilo (PVA).

A polimerização em emulsão realiza-se mediante uma emulsão de pequenas gotas do monômero em água, com o auxílio de um emulsionante. Este constitui o método mais importante de polimerização e utiliza-se para a formação do policloropreno, do policloreto de vinila e dos copolímeros de butadieno-estireno (ELIZABETE *et al*, 2001).

Comumente utilizam-se siglas para representar ou substituir a nomenclatura de polímeros, sendo essas siglas de uso internacional:

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

2.2.3 Peso Molecular

O peso molecular de um polímero é o grau de polimerização multiplicado pelo peso molecular de uma unidade que se repete.

Segundo Koerner (2005), o peso molecular constitui um dos aspectos fundamentais da estrutura dos polímeros, uma vez que se relaciona diretamente com a massa das macromoléculas. A propriedade mecânica é proporcional ao tamanho da macromolécula, quanto maior seu tamanho melhor é a propriedade mecânica. O grau de polimerização (n) expressa o número de unidades repetitivas que formam a cadeia polimérica, sempre abordada em termos de valores médios, uma vez que o processo de polimerização produz macromoléculas de tamanho variado. O peso molecular numérico médio (M_n) expressa a média numérica do peso das cadeias que formam uma amostra de polímero, e pode ser obtido diretamente a partir da multiplicação do grau de polimerização numérico médio pelo peso molecular do mero.

Enquanto o peso molecular numérico médio é fortemente dependente do número de moléculas dentro de cada faixa de peso molecular, o peso molecular ponderal médio é sensível à massa de cada uma das macromoléculas da amostra (média ponderada do peso das cadeias). Faixas típicas de peso molecular ponderal médio para resinas de PVC situam-se entre 40.000 e 100.000 g/mol e para HDPE situa-se entre 20.000 e 80.000 g/mol.

Outro parâmetro importante a ser considerado é a distribuição de pesos moleculares do polímero, ou seja, o grau de diversidade de tamanhos das macromoléculas. Esse parâmetro é conhecido como coeficiente de polidispersividade ou, simplesmente, polidispersividade, e é determinado por meio da razão entre os pesos molecular ponderal médio e numérico médio (M_w/M_n). Polímeros monodispersos ideais, ou seja, que possuem um único tamanho de macromolécula possui coeficiente de polidispersividade igual à unidade, enquanto polímeros comerciais exibem polidispersividade superior a 1, sendo esse valor variável, dependendo do processo de síntese. Resinas de PVC apresentam em geral distribuição estreita de peso molecular, com índice de dispersividade em redor de dois. A determinação do peso molecular de resinas de PVC é feita indiretamente por meio de técnicas de viscosimetria, (NUNES, 2006).

2.2.4 Classificação dos Polímeros

Os polímeros podem ser classificados de diferentes formas. Cada critério utilizado para essa classificação enfoca um determinado aspecto de polímero. Segundo Mano (1991), as principais classificações são as que se baseiam:

- Na fusibilidade e/ou solubilidade do polímero;
- No número de monômeros, e,
- Na configuração dos átomos da cadeia polimérica.

De acordo com a origem do polímero, este pode ser natural ou sintético. Apesar da quantidade de polímeros naturais excederem de longe a produção de polímeros sintéticos da indústria moderna, os polímeros naturais perderam sua importância econômica com o advento da tecnologia dos polímeros. No entanto, os polímeros naturais estão retomando a sua importância econômica com a mudança de atitude da humanidade através da conscientização ecológica. Os polímeros naturais mais conhecidos e utilizados são: a borracha natural (cis-poliisopreno), a celulose e as proteínas. Entre os polímeros sintéticos temos o polietileno, o polipropileno, o PET, como alguns exemplos. Um tipo de classificação muito utilizado pelas indústrias é a que se baseia na solubilidade e/ou fusibilidade do polímero. Estas duas propriedades são muito importantes do ponto de vista tecnológico.

Os polímeros que podem ser fundidos por meio de aquecimento e solidificados por resfriamento sem que ocorra decomposição generalizada são chamados termoplásticos. Neste grupo, estão inseridos também os polímeros solúveis em solventes adequados. Do ponto de vista estrutural, isso ocorre porque os polímeros deste grupo possuem cadeia linear, ramificada ou não. O outro grupo desse tipo de classificação é o dos termorrígidos que sob aquecimento acabam se decompondo sem fundir-se. Esses polímeros possuem cadeias com ligações cruzadas.

Do ponto de vista tecnológico, a classificação que se baseia no comportamento mecânico do polímero é muito importante, uma vez que elas determinam a utilidade do material. Eles podem ser divididos em três grupos: borrachas, plásticos e fibras. O pneu, a garrafa descartável de PET e os tecidos sintéticos, estão classificados, respectivamente, como borracha, plástico e fibras.

Quanto ao número de monômeros usados na produção do polímero, este pode ser homopolímero, se foram usados apenas um monômero, ou copolímero, se foram usados dois ou mais monômeros.

Quando se considera o método de preparação do polímero, eles podem ser classificados em polímeros de adição, quando ocorre uma reação de adição comum, ou polímeros de condensação, quando ocorre uma reação de polimerização com formação de subprodutos. Esses subprodutos costumam ser micromoléculas como H₂O, HCl ou KCl. Existe outra classificação muito importante que leva em consideração os grupos funcionais presentes na macromolécula. É a classificação de acordo com a estrutura química da cadeia polimérica. Os polímeros podem então ser classificados em poli hidrocarbonetos, poliuretanas, poliamidas, entre outras.

Quando o polímero é um dieno, que pode ser definido como hidrocarbonetos de cadeia aberta com duas ligações entre carbonos, existe a classificação que leva em conta a configuração dos átomos da cadeia polimérica, podendo os polímeros ser divididos em *cis* ou *trans*. De acordo com o encadeamento da cadeia polimérica, o polímero pode ser do tipo cabeça-cauda, quando os meros são incorporados na cadeia de maneira regular, ou do tipo cabeça-cabeça, cauda-cauda.

De acordo com a taticidade da cadeia polimérica os polímeros podem ser ainda isotáticos (sempre forma cristais), sindiotáticos (pode formar cristais) e atáticos (nunca forma cristais).

Existem apenas alguns polímeros que compõem a maioria dos geossintéticos fabricados. A Tabela 2-7 apresenta a repetição de unidade molecular de polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos.

Tabela 2-7 - Repetição unidade molecular de polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos (Adaptado de Koerner, 2005)

Polímero	Unidade repetitiva	Tipo de geossintético
Poliétileno (PE)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	Geotêxtis, geomembranas, geogrelha, tubo dreno, georrede, geocomposto.
Polipropileno (PP)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	Geotêxtis, geomembranas, geogrelha, geocomposto.
Policloreto de Vinila (PVC)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{Cl} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	Geomembrana, tubo dreno, geocomposto.
Poliéster (PET)	$\left[\text{O}-\text{R}-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}'-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}} \right]_n$	Geotextil, geogrelha
Poliamida (PA)	$\left[\begin{array}{cccc} \text{H} & & \text{H} & \text{O} \\ & & & \\ -\text{N} & -(\text{CH}_2)_6- & \text{N} & -\text{C}- \\ & & & \\ & & & \text{O} \end{array} \right]_n$	Geotextil, geogrelha, geocomposto.
Poliestireno (PS)	$\left[\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C} \\ & // \\ & \text{H} \end{array} \right]_n$	Geocomposto, geoexpandido.

2.2.5 Cristalinidade em polímeros

A maioria das moléculas podem se apresentar em um dos três estados: gás, líquido e sólido. Os polímeros são moléculas grandes e apresentam uma somatória e forças intermoleculares fortes e não apresentam uma fase de vapor, pois as mesmas se decompõem antes que a temperatura seja suficiente para vencer as forças intermoleculares.

A cristalinidade em polímeros pode ser definida como um arranjo ordenado tridimensional das estruturas macromoleculares dos polímeros; os polímeros, dependendo de vários fatores, podem

apresentar estruturas com algum grau de cristalinidade, mas na prática 100% de cristalinidade não é atingida. Os polímeros parcialmente cristalinos apresentam regiões cristalinas e amorfas, pois combina a resistência da fase cristalina com a flexibilidade da fase amorfa sendo que esta característica é que mostra a habilidade do material dobrar-se sem quebrar.

A cristalinidade torna o polímero mais rígido, mais resistente à temperatura, ou seja, ele se funde em temperatura mais alta e, mais resistente a penetração de solventes. Por outro lado a cristalinidade torna o polímero mais forte, mas menos resistente ao impacto, alongamento na ruptura e ao fenômeno de stress-cracking (microfissuramento sob um estado de tensão).

Em polímeros, as regiões cristalinas são denominadas cristalitos; alguns polímeros cristalinos podem apresentar uma microestrutura com esferulitos, que são arranjos esféricos, birrefringentes, de cristais interligados com regiões amorfas, e que apresentam a forma de uma cruz de Malta quando observados em microscópios ópticos com luz transmitida e polarizada. Os esferulitos aparecem em função das condições de cristalização, que têm grande influência nas propriedades dos polímeros cristalinos.

Segundo Koerner (2005), a quantidade de cristalinidade varia de 30% para alguns PVC e 65% para os HDPE. A cristalinidade pode ser determinada através dos ensaios de Difração de raio-X e Microscopia Eletrônica, sendo a primeira mais precisa para determinar a cristalinidade.

2.2.6 Transição térmica dos polímeros

Segundo Koerner (2005), existem basicamente dois tipos de temperaturas: temperatura de transição vítrea (T_g), e temperatura de fusão (T_m). A transição de fusão é mais intuitiva e de fácil entendimento, mas, o mesmo não acontece para a temperatura de transição vítrea.

A transição vítrea (T_g) é uma característica de materiais amorfos, sendo definida como a passagem do estado vítreo para o estado elastomérico. Em outras palavras, nessa transição o polímero passa de um estado desordenado rígido (vítreo) para um estado desordenado no qual as cadeias poliméricas possuem uma mobilidade maior. Essa mobilidade no caso de algumas classes de polímeros dá origem ao comportamento de elasticidade de borracha. A Tabela 2-8 apresenta os valores de temperatura T_g e T_m para os tipos de polímeros mais comuns que são utilizados na fabricação de geossintéticos.

Tabela 2-8 – Temperatura de transição de polímeros (Adaptado de Koerner, 2005)

Unidade do monômero	Temperatura de transição vítrea (T_g °C)	Temperatura fusão (T_m °C)
Polietileno (PE)	-125	141
Propileno (PP)	-7	187
Estireno	100	240
Cloreto vinila (PVC)	81-98	273
Álcool vinila (PVA)	85	265
Tereftalato de etileno (PET)	60-85	280
Nylon 66	50	280

Apesar de grande parte dos materiais sólidos que nos cercam possuírem estrutura desordenada, ou seja, amorfa, as transições de fases sólido-sólido ou sólido-líquido abrangem sólidos cristalinos.

Os polímeros que formam os plásticos, borrachas e vidros são exemplos de materiais sólidos com estrutura desordenada. Sendo assim, ao passar da fase sólida para a fase líquida, não estão realizando uma fusão, como os materiais cristalinos, mas sim uma transição de fase chamada de *transição vítrea* (T_g). Existem também vários polímeros que possuem estrutura semicristalina, apresentando uma parte da sua estrutura ordenada e outra amorfa, (WAN *et al.*, 2001).

Um fato importante acerca das fases da matéria que são densas, como sólidos cristalinos, é que forças intermoleculares mantêm as moléculas ou átomos unidos, portanto é necessária uma quantidade de energia para retirar as partículas do arranjo cristalino ordenado para o arranjo desordenado no estado líquido, que possui distâncias de separação ligeiramente maiores. Essa energia é o calor de fusão. Enquanto a fusão é uma transição na qual a fase cristalina perde sua estrutura repetitiva, a transição vítrea (T_g) pode ser entendida como um ganho de mobilidade da fase desordenada. Na transição da fase sólida cristalina para líquido, o modelo de esferas rígidas é muito útil para a representação da mudança estrutural ocorrida. O estado líquido é representado com esferas aleatoriamente distribuídas apresentando, inclusive, movimento translacional (MANO e MENDES, 1999).

Segundo Yamaki *et al.*(2002) os modelos cinético e termodinâmico para descrever o fenômeno de transição vítrea ainda não pode ser estabelecida seguramente.

2.3 Fabricação das geomembranas

Segundo Koerner (2005) o processo de manufatura das geomembranas inicia-se com a produção da matéria prima bruta como a resina polimérica e também de vários aditivos como antioxidantes, plastificantes, negro de fumo e lubrificantes. A Tabela 2-9 apresenta as formulações usuais dos geossintéticos manufaturados.

Tabela 2-9 - Geossintéticos Poliméricos comumente usados e suas formulações aproximadas (Adaptado de Koerner, 2005)

Tipo de polímero	Resina (%)	Carga (%)	Negro de Fumo ou Pigmento (%)	Aditivos (%)	Plastificante (%)
Polietileno (PE)	95-97	0	2-3	0,5 – 1,0	0
Polipropileno Flexível (PP)	95-97	0	2-3	0,5 – 1,0	0
Policloreto Vinila (PVC) sem Plastificantes	80	10	5-10	2,0 – 3,0	0
Policloreto Vinila (PVC) com Plastificantes	50-70	5-10	1-2	2,0 – 3,0	25-35
Poliéster (PET)	97	0	2-3	0,5 – 1,0	0
Poliamida - Nylon (PA)	97	0	2-3	0,5 – 1,0	0
Poliestireno (PS)	97	0	2-3	0,5 – 1,0	0
Polietileno Clorossulfonado (CSPE)	40-60	20-40	20-25	0,5 – 1,0	0
Terpolímero de Etileno-propileno-dieno (EPDM)	25-30	20-40	20-40	1-5	0

Essas matérias primas são em seguida processadas em folhas de geomembranas de várias larguras e espessuras, comumente existe três processos de manufatura que são apresentados na Figura 2-1.

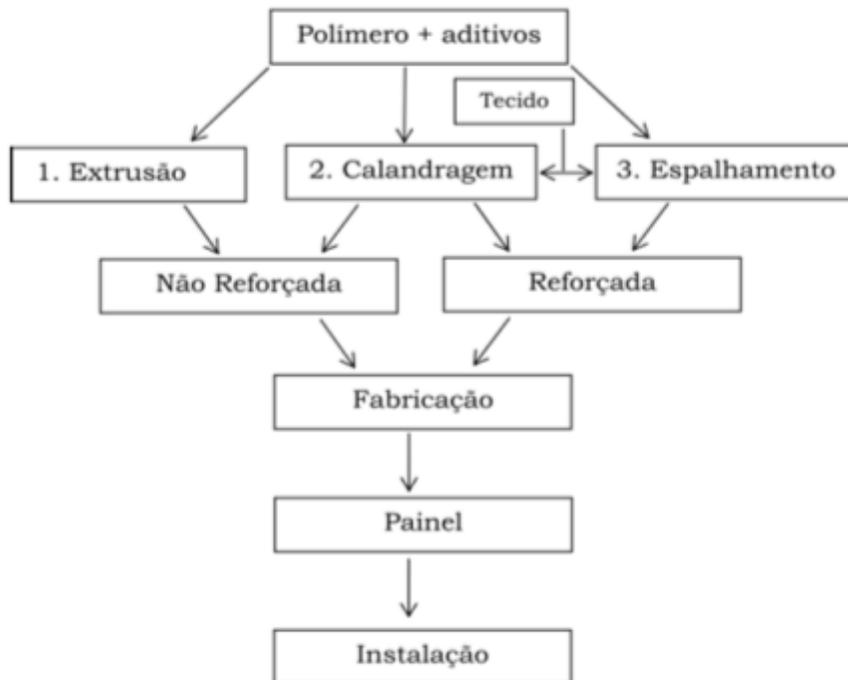


Figura 2-1 Três métodos usados para manufatura de geomembranas (KOERNER, 2005)

As geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (HDPE), de Polietileno de Baixa Densidade (LLDPE) e Polipropileno Flexível (fPP) são fabricadas pelo método de extrusão. A resina polimérica em forma de peletizado é misturada com uma misturadora de peletizado que contém negro de fumo, estabilizadores e antioxidantes em uma resina veiculo. Os dois materiais peletizados são carregado pneumaticamente no alimentador de uma extrusora que possui uma rosca sem fim. A formulação passa sucessivamente através de uma seção de alimentação, de compressão e de dosagem onde é finalmente emergido em um material fundido na forma da matriz utilizada. No processo de extrusão de fabricação das geomembranas existem dois métodos, a saber: (1) matriz plana e (2) matriz balão.

O primeiro processo é chamado de matriz plana, onde a formulação polimérica é comprimida entre duas calandras paralelas, resultando em uma chapa de espessura rigorosamente controlada de 0,75 a 3 mm, as larguras variam entre 1,80 a 4,60, mas quando as extrusoras são usadas em paralelo podem-se obter larguras de até 9,50m. A Figura 2-2 apresenta o esquema de produção da matriz plana.

O segundo processo é chamado de matriz balão, onde a formulação polimérica é comprimida para cima entre duas calandras orientadas verticalmente. Depois de passar pelas calandras, a formulação é transferida para um sistema circular que, finalmente chega a dois rolos superiores que

orientam a saída do material para ser cortado longitudinalmente e desdobrado em sua largura total, a Figura 2-3 apresenta o esquema de produção da matriz balão.

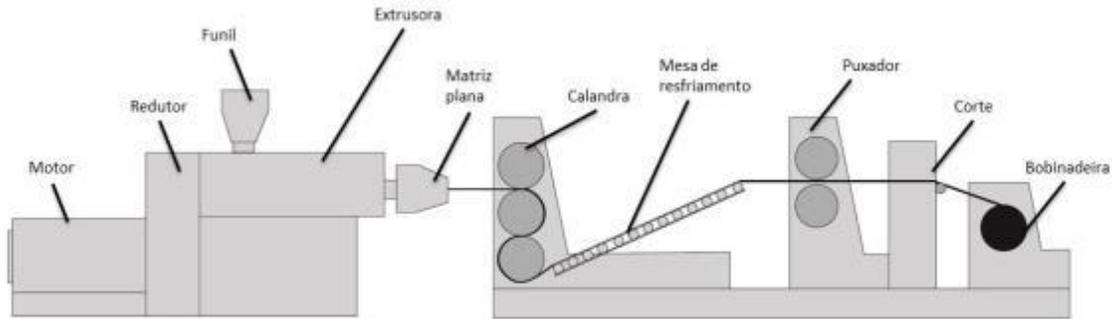


Figura 2-2 Processo de extrusão matriz plana - NORTENE (2013)

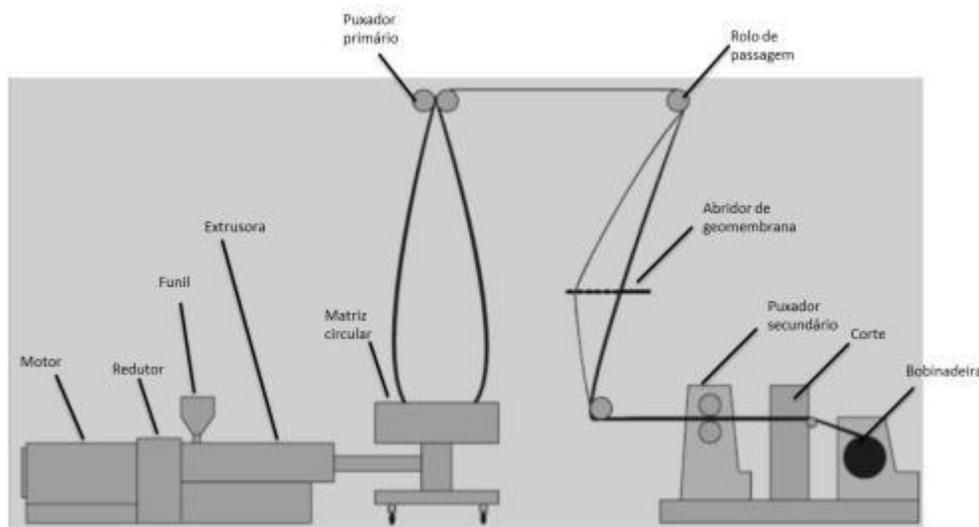


Figura 2-3 Processo de extrusão matriz balão - NORTENE (2013)

As geomembranas lisas de HDPE, LLDPE e fPP podem ter uma ou duas superfícies rugosas, para isto existem quatro métodos para texturizar geomembranas, são eles: (1) coextrusão, (2) intrusão, (3) laminação, (4) estruturação.

A coextrusão é comumente o método mais utilizado para texturizar geomembranas de polietileno ela utiliza um agente de sopro na amostra extrudada fundida conduzindo-a imediatamente a uma pequena extrusora adjacente para a extrusora principal. Quando ambos os lados da placa são texturizados, duas pequenas extrusoras (uma interna e outra externa à extrusora principal) são utilizadas. Quando a amostra extrudada dessas extrusoras menores encontra uma bolha de ar frio, o agente de sopro expande-se abrindo para a atmosfera e criando a superfície texturizada.

A intrusão de partículas (*impingement*) de polietileno quente é o segundo método de texturização. As partículas quentes são projetadas sobre a chapa previamente fabricada sobre uma ou

ambas as superfícies numa segunda operação. Aproximadamente 15 cm das bordas longitudinais podem não ser texturizadas para facilitar as emendas. Esse método é comumente utilizado na Europa, mas não utilizado com frequência nos Estados Unidos devido ao alto custo de fabricação (KOERNER 2005).

O terceiro método de texturização é chamado laminação, neste método é utilizada um agente espumante que contem dentro um polímero fundido, onde a espuma é aderida sobre uma chapa lisa previamente fabricada. Se houver necessidade de texturização de ambos os lados da manta, o rolo deve repetir o ciclo descrito para o lado oposto.

Aproximadamente 15 cm das bordas longitudinais podem não ser texturizadas para facilitar as emendas. Esse método é raramente utilizado devido ao seu alto custo de produção.

O quarto e ultimo método de texturização é chamado de estruturação ou padronização. Nele uma chapa lisa é produzida pelo método de matriz plana e logo após é levado para as calandras paralelas que passam entre dois rolos em contra rotação. Esses rolos tem a superfície estampadas permitindo que as chapas quentes com aproximadamente 120°C, passem entre eles deformando-se sua superfície de acordo com estampa, as mesmas podem ser serrilhadas, rugosas e etc. Este método de fabricação é comumente utilizado para geomembranas fabricas na Europa.

As geomembranas de PVC, CSPE e reforçadas são manufaturadas pelo processo de calandragem. Nesse método, a resina polimérica, negro de fumo, carga, plastificantes e um pacote de aditivos pesados (Tabela 2-9) são misturados em uma câmara (*Bandury-type*) ou numa câmara (*Farrel-type*). Durante a mistura adiciona-se calor que inicia a reação entre os componentes.

Após passar pelo misturador, o material é encaminhado por um transportador para um moinho de rolos onde ainda será misturado e moído. Na forma de uma massa contínua, passará através de um conjunto de rolos para formar a chapa final. A calandragem produz geomembranas com larguras de até 2,40m. Para a produção de larguras maiores (painéis), os rolos são emendados pelo próprio fabricante e, posteriormente, enviados para a obra devidamente dobrados ou podem ser emendados na própria obra.

As geomembranas podem ser manufaturadas pelo método do espalhamento (*spread coating*). Nesse método, o polímero fundido é espalhado numa fina camada sobre um material tecido ou ainda, sobre um não tecido. Geralmente, os espaços da abertura dos poros são insuficientes para permitir a passagem para o lado oposto. Dessa maneira, se a camada é requerida em ambos os lados, deve-se virar o material e repetir o processo.

Para os diferentes processos de manufatura descritos acima é importante ressaltar que estes frequentemente envolvem muitas empresas distintas: o fabricante de resina, de aditivos, os fabricantes das geomembranas e eventualmente os instaladores. Portanto, há a necessidade de um processo de comunicação entre estas partes envolvidas para que o produto possa atender às suas especificações. A maioria dos problemas e enganos surge devido ao grande número de partes envolvidas no processo de fabricação. É fundamental que as medidas de Controle de Qualidade de Fabricação sejam levadas em conta pelo fabricante e construtor para que seja levada para a obra a geomembrana que foi projetada, especificada e comprada (KOERNER 2005).

2.4 Ensaios em geomembranas

A caracterização das geomembranas pode ser realizada por diversos tipos de ensaios. Para a realização desses ensaios com geossintéticos, muitas normas e especificações têm sido utilizadas, em destaque os diversos tipos de geomembranas. Dentre as diversas normas existentes destacam-se as normas ISO (*International Organization for Standardization*), as americanas ASTM (*American Society for Testing and Materials*), e as europeias (*European Committee for Standardization*). No contexto nacional, as normas brasileiras (NBR).

Segundo Rigo & Cazzuffi (2005), a caracterização de geomembranas requer duas importantes etapas: (1) ensaios de identificação; (2) ensaios de desempenho, para estes quando se trata de geomembrana é possível dividi-los em: estudos de durabilidade e uniões. De modo a avaliar as características da geomembrana, procedimentos de ensaios foram desenvolvidos, mas, geralmente, de acordo com uma abordagem muito específica, que leva em consideração os diferentes tipos de produtos e, por vezes, os diferentes tipos de aplicações. Com em obras hidráulicas (lagoas, canais e reservatórios), a ASTM prescreve especificações diferentes, de acordo com os diferentes tipos de produtos.

Para geomembranas de polietileno utiliza-se a ASTM D3020-89, de cloreto de polivinil a ASTM D3083-89, sem reforço elastoméricos a ASTM D3253-81 e com reforço elastoméricos a ASTM D3254-81. Presume-se que o tipo de geomembrana tem uma influência especial sobre a escolha dos processos de ensaio de identificação, enquanto os testes de desempenho são mais influenciados pela aplicação particular.

Bueno (2003) enfatiza a importância dos ensaios de identificação, pois além dos ensaios de desempenho, há também a preocupação com o controle da qualidade e os tipos de produtos que compõem a formulação da geomembrana. Em vista disso, com muita frequência, devem ser incorporados ensaios de identificação dos componentes químicos, como análises termogravimétricas (TGA), termomecânicas (TMA) e calorimetria diferencial de varredura (DSC).

Koerner (2005) destaca que os ensaios das propriedades físicas são importantes para o controle de qualidade, garantia da qualidade e na identificação do produto. Segundo o autor esses ensaios são: espessura, densidade, índice fluidez (MI), gramatura, permeabilidade ao vapor de água (VWT) e transmissividade aos vapores de solventes (SVT).

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

Os ensaios de desempenho devem demonstrar a capacidade de a geomembrana exercer sua função em campo, levando-se em conta as tensões *in situ* e as condições ambientais. Esses ensaios podem ser realizados no corpo principal da geomembrana ou nas emendas de construção. Os ensaios de durabilidade têm como objetivo controlar a capacidade da geomembrana ou do sistema como um todo, incluindo a geomembrana, de resistir às tensões ao longo do tempo. (LODI, 2003).

Na Tabela 2-10 são apresentados os diversos ensaios em geomembranas, os quais foram divididos em: Ensaios de caracterização, desempenho e de durabilidade:

Tabela 2-10 – Ensaios em geomembranas

Ensaios de Caracterização	Métodos de Ensaio
Espessura	ABNT NBR12569, ASTM D1593, D5199, D3767e EN 1849-2
Densidade	ASTM D792, D1505, D297 e ISO 1183
Massa por Unidade de Área	ABNT 12568, ASTM D3776 e EN 1849-2
Ensaio de Resistência Tração Simples (RTS)	ABNT NBR12824, ASTM D638, D882, D751 e ISO 527
Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	ASTM D3417, D3418 e ISO 11357
Análise Termogravimétrica (TGA)	ASTM D6370, E2105 e ISO 11358
Análise Termomecânica (TMA)	ASTM D648 e E831
Índice de Fusão (MFI)	ASTM D1238
Teor de Solventes	ASTM D297
Dureza	ASTM D2240 e ISO868
Extraíveis	ASTM D297, D3421 e ISO 6427
Teor de cinzas	ASTM D297
Tempo de Oxidação (OIT)	ASTM D3895
Teor de Negro de Fumo ⁽¹⁾	ASTM D1603
Dispersão de Negro de Fumo ⁽¹⁾	ASTM D5596 e D3015
Ensaios de desempenho	Métodos de Ensaio
Resistência ao Rasgo	ASTM D1004, D2263, D624 e ISO34
Resistência ao Estouro	ASTM D5617 e EN 14151
Resistência ao Puncionamento	ASTM D4833, EN ISO 12236, FTMS 101C e ABNT NBR13359
Cisalhamento	ASTM D5321, EN ISO 12957-1 e 12957-2
Fluência	ASTM D5262
Expansão Térmica	ASTM D696
Estabilidade Dimensional	ASTM D1204
Permeabilidade (água)	ASTM E96, EN 14150 e ISO 11058
Permeabilidade (vapor)	ASTM D1434, E96 e ISO 11058
Ensaios de durabilidade	Métodos de Ensaio
Abrasão	ASTM D460 e D2228
Exposição à Intempérie	ASTM D1435, EN 12224 e ABNT NBR15352
Envelhecimento Térmico	ASTM D573
Exposição ao Calor (Estufa)	ASTM D794 e D5721
Exposição à Radiação UV	ASTM G153, G154, G155 e ISO 4893
Resistência Química	EPA 9090, EN 14414, ASTM D5747 e D5322
Resistência Biológica	EN 12225, ASTM G22 e G21
Envelhecimento por Ozônio	ASTM D1149
Fissuramento sob Tensão ⁽¹⁾	ASTM D696, D1693, D5397 e ISO 6252

Nota: (1) os referidos ensaios são realizados somente para o polietileno.

2.4.1 Espessura

Para a verificação da espessura da geomembrana é realizada a medida em vários pontos de seu plano. Para as geomembranas lisas utiliza-se o método de ensaio da ASTM D5199-2012 e o método D5994-2010 para geomembranas texturizadas. Para as geomembranas lisas aplica-se uma carga sobre uma placa que estará em contato com toda a superfície da geomembrana e mede-se a distância entre os pontos superior e inferior desta sob o efeito da carga de 20 kPa, depois da aplicação da carga a leitura

será feita depois de 5 segundos. O método de ensaio D5199 sugere no caso de conseguir-se aplicar a carga sem a utilização da placa a aplicação de uma carga de 50 a 200 kPa, pois algumas geomembranas de HDPE são rígidas e poderiam não deformar-se com a pressão de 20 kPa.

2.4.2 Densidade ou Peso Específico

A densidade ou peso específico exprime a relação entre a unidade de peso do produto ensaiado em relação ao peso da unidade de água. A determinação da densidade pode ser realizada por meio das normas ASTM D792-2013 (Método de deslocamento); ASTM D1505-2010 (Método pela técnica de gradiente de densidade); ASTM D297-2013 (Métodos de utilização de um picnômetro e por pesagem hidrostática)

O método prescrito pela ASTM D792-2013 é baseada no Principio de Arquimedes e, esse método é rápido e simples. Quando da utilização de materiais com densidade menor que a água recomenda-se a ASTM D1505-2010.

2.4.3 Massa por Unidade de Área

A massa por unidade de área é uma propriedade física comumente utilizada para caracterizar o peso de uma geomembrana. Esta medição pode ser realizada de acordo com a norma ASTM D3776-2013. De acordo com a norma, a massa por unidade de área é determinada pela razão da massa pela respectiva área da amostra. As dimensões e massas devem ser determinadas de acordo com Sistema Internacional, podendo ser por expresso em g/m^2 . Ainda preconiza que as amostras devem ter área mínima de 130 cm^2 .

2.4.4 Resistencia a Tração Simples (RTS)

Segundo Rigo & Cazzuffi (2005), as propriedades de tração de materiais poliméricos são geralmente analisadas por meio de um ensaio de tensão *versus* deformação. As propriedades específicas que são medidas dependem do tipo de geomembrana que podem incluir: tensão e deformação no escoamento (se a geomembrana é semicristalina); tensão e deformação na ruptura (se a geomembrana é semicristalina); tensões em deformações específicas (para avaliação do módulo, por exemplo entre 100% e 200%); tensão e deformação na falha da geomembrana e deformação na falha da geomembrana. A Figura 2-4 ilustra do ponto de vista qualitativo o comportamento à tração dos diferentes tipos de tração.

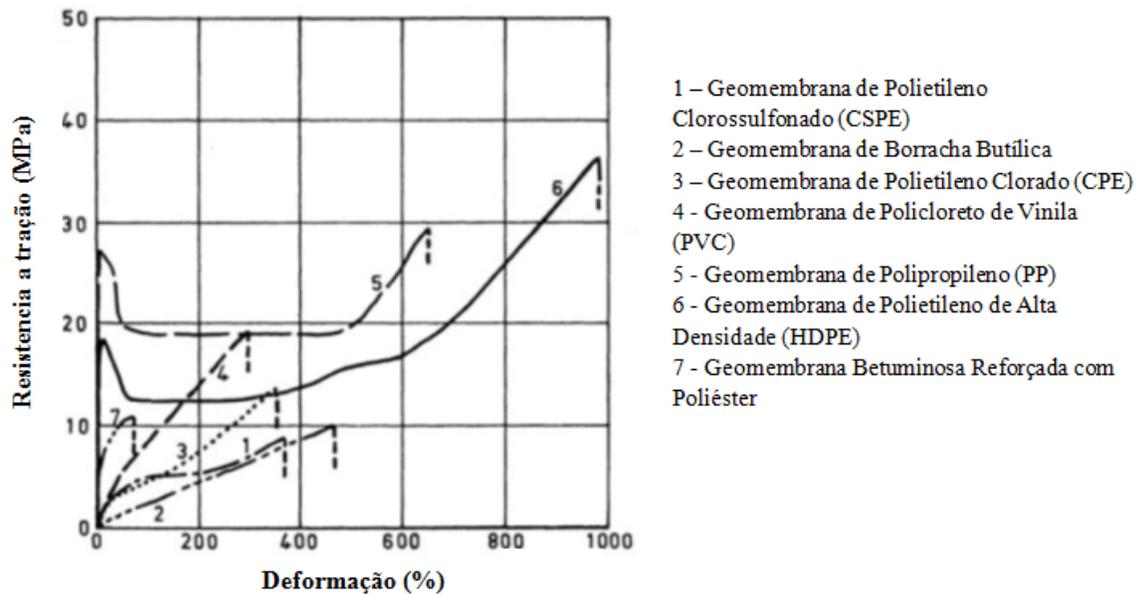


Figura 2-4 – Comportamento da tensão versus deformação para diversos tipos geomembranas (RIGO & CAZZUFFI, 2005).

No caso de geomembranas não reforçadas, as amostras em forma de halteres são comumente usadas (Figura 2-5): a geometria exata da amostra e a taxa de deformação dependem do padrão selecionado e do polímero. Para a execução dos ensaios de tração, sugerem-se as seguintes normas:

- ✓ ASTM D6693-2010 e ASTM D882-2012 para geomembranas termoplásticas;
- ✓ ASTM D412-2013 para geomembranas elástica sem reforço;

Em caso de geomembranas reforçadas (betuminosa, PVC reforçado, elastômeros reforçados), os espécimes retangulares (largura 50 mm e 200 milímetros comprimento calibre) são comumente adotados. As tensões são geralmente relacionadas com a largura da amostra e não para a sua seção transversal. O ensaio de tração pode ser utilizado como teste de identificação e teste de desempenho, tal como o controle depois de envelhecimento.

Ensaio de tração são, provavelmente, os testes mais utilizados nas indústrias de borracha e plástico também para avaliar as composições e produtos poliméricos, porque as propriedades de tração podem dar uma boa indicação da qualidade do composto típico de uma geomembrana. Alguns programas de pesquisa estão em andamento, a fim de selecionar apenas um tamanho de amostra e uma metodologia para todos os tipos de geomembranas, tanto betuminosa e polímeros.

Um padrão para testar todos os tipos de geomembranas poliméricas com um método de bandas largas (amostra de 200 mm de largura e 100 mm de comprimento de calibre) fora nos Estados Unidos (ASTM D 4885-2011). De acordo com este padrão a força na geomembrana é dada em kN/m.

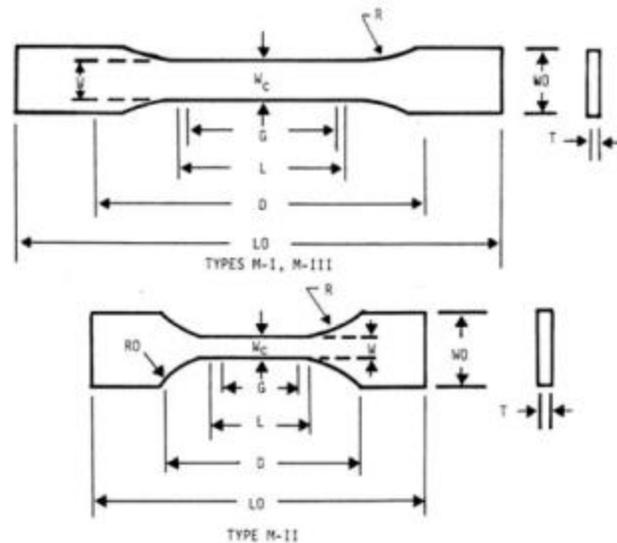


Figura 2-5 – Corpo de prova em formato de halteres de acordo com a ASTM 638: LO varia de 60 a 150mm e W varia de 2,5 a 10mm. (ASTM, 638-2010)

Lodi 2003, destaca o inconveniente em realizar ensaios de tração em forma de halteres em geomembranas, que é a ocorrência de uma contração na região central do corpo de prova de maneira a apresentar um comportamento unidimensional que geralmente não ocorre no campo. Com o objetivo de aperfeiçoar o ensaio, corpos de provas com dimensões maiores devem ser utilizados.

A ASTM 4885 utiliza ensaios denominados de “faixa larga” onde os corpos de prova de geotêxteis têm tamanho de 200x200mm e, as geomembranas têm 200x100mm sendo que a dimensão de 100 mm será o comprimento tracionado. A taxa de deformação recomendada é de 1mm/min para melhor simular as condições de deformação da geomembrana na obra. Entretanto essa taxa não é simples de ser obtida pois a deformação das geomembranas de HDPE e PVC podem chegar a 1000% e 400% respectivamente, tornando os ensaios extremamente morosos, podendo demorar até 20 horas para a ruptura do corpo de prova.

Esse tipo de ensaio teria como objetivo provar o desempenho da geomembrana sendo inadequado para controle de qualidade. Ainda de acordo com a ASTM 4885-2011, a taxa de deformação pode ser alterada em função das análises a serem executadas. A Figura 2.6 apresenta um ensaio de faixa larga em uma geomembrana.



Figura 2.6 – Ensaio de tração em geomembrana de HDPE

2.4.5 Análise de Calorimetria Diferencial por Varredura (DSC)

Este ensaio consiste em que uma pequena amostra da geomembrana (alguns miligramas) seja submetida a um fluxo térmico. Todos os fenômenos, que conduzem a uma produção ou uma absorção de calor, são dados em diagramas picos endotérmico ou exotérmico. Informações como a temperatura de transição vítrea (T_g), transições endotérmicas (fusão) e exotérmicas (cristalização) podem ser observadas com a DSC. A Figura 2.7 mostra alguns resultados de DSC para os poliésteres.

As análises do DSC são feitas de acordo com a norma a ASTM 3418-2012.

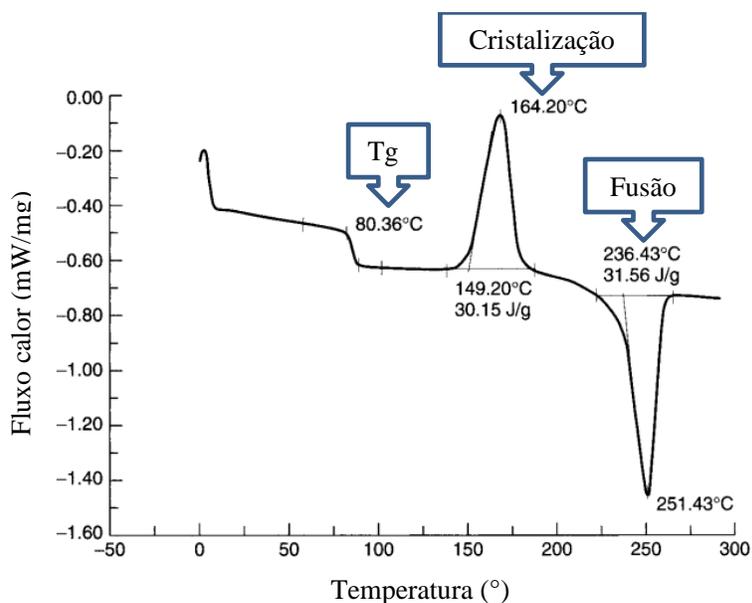


Figura 2.7 – Curvas de DSC para poliéster (Adaptado de KORNER, 2005)

2.4.6 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica térmica que permite avaliar a composição de um material por meio da sua perda de massa durante o aquecimento, a uma taxa controlada, numa atmosfera inerte ou oxidante. Quando uma geomembrana é aquecida numa atmosfera inerte, a uma temperatura de 790°C, a uma taxa controlada, ela irá volatilizar a diferentes temperaturas restando somente resíduos de negro de fumo, polímero carbonado e cinzas. A introdução de oxigênio no sistema irá queimar o resíduo polímero carbonáceo e negro de fumo.

A massa residual *versus* a curva do tempo, que pode ser expressa também *versus* temperatura, pode ser utilizado para calcular o teor de polímero e aditivos, o teor de negro de fumo e o teor de cinzas. A curva de TGA e a derivada da curva de TGA podem ser utilizadas como parte da impressão digital de um material polimérico, a análise é feita de acordo com a norma D6370-2009. A Figura 2-8 e a Figura 2-9 apresenta alguns resultados de TGA para amostras de PED e PVC, respectivamente.

As aplicações específicas da análise termogravimétrica podem ser resumidas em:

- ✓ Decomposição térmica de substâncias inorgânicas, orgânicas de baixa massa molar e de polímeros (determinação da temperatura de decomposição);
- ✓ Pirólise de diversas substâncias;
- ✓ Determinação de umidade, teor de voláteis e de cinzas;
- ✓ Estudos de degradação e higroscopicidade;

- ✓ Oxidação térmica degradativa de substâncias poliméricas;
- ✓ Estudos cinéticos de reações;
- ✓ Curvas de adsorção e dessorção.

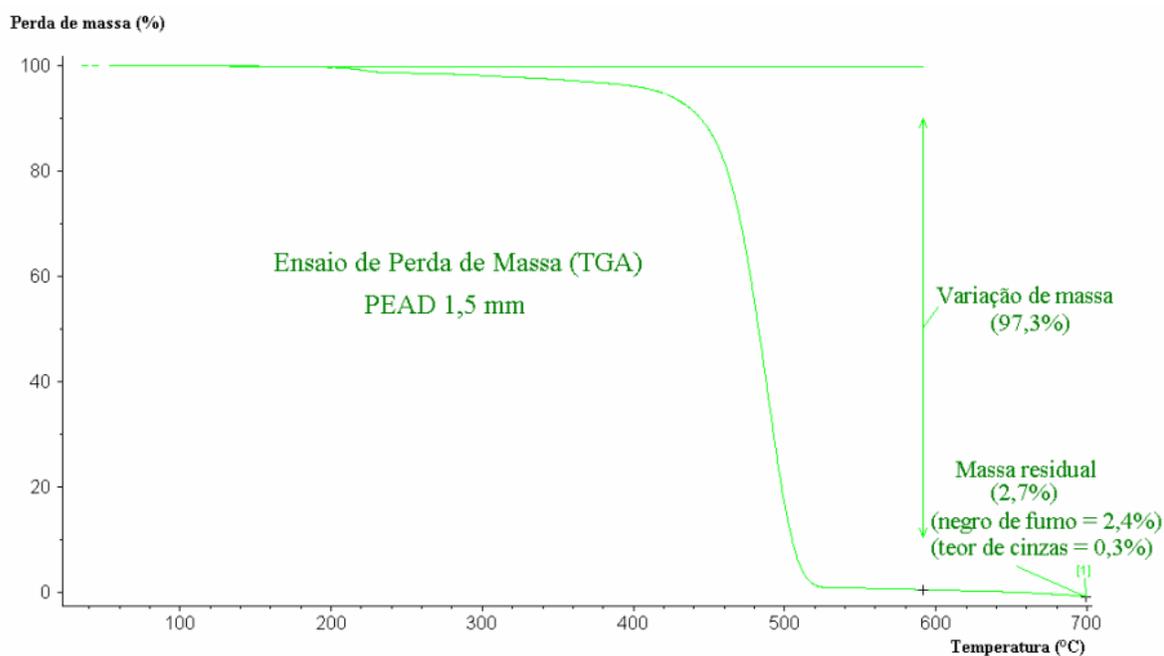


Figura 2-8 - Exemplo de curva de perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de HDPE, 1,50mm (LODI, 2003)

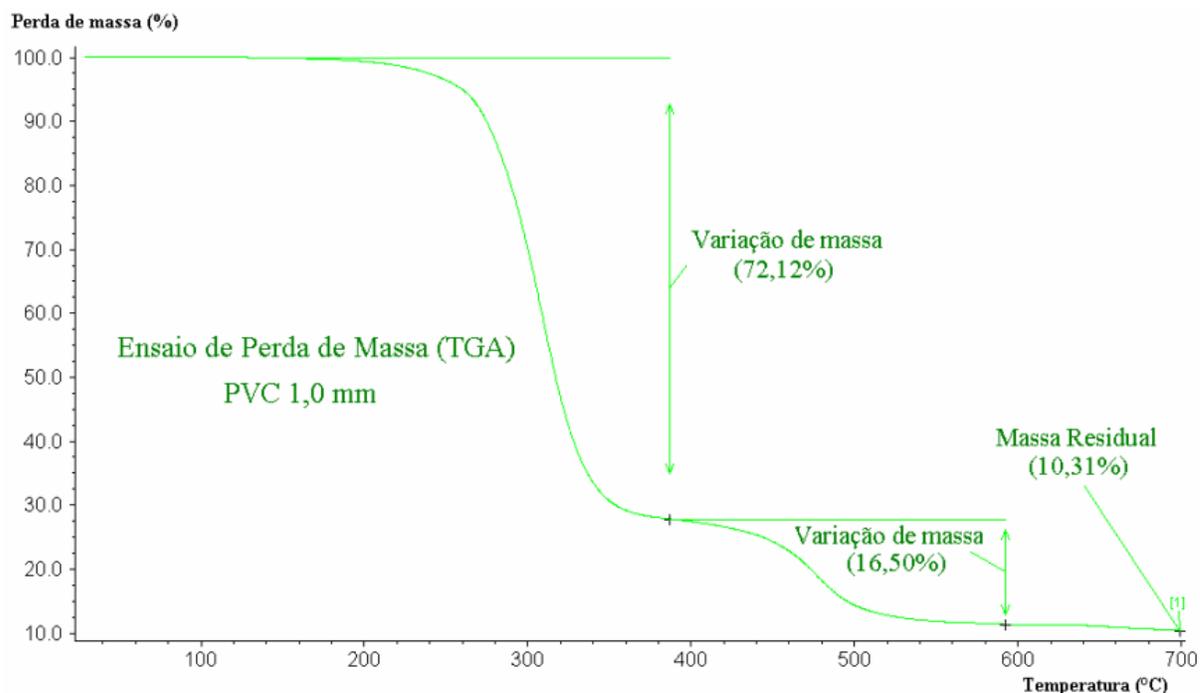


Figura 2-9 - Exemplo de curva de perda de massa em ensaio de TGA para uma geomembrana de PVC, 1,0mm (LODI, 2003)

Alguns parâmetros podem ser obtidos através dos gráficos perda de massa vs variação da temperatura, para isso adotou-se a convenção utilizada por COLMANETTI(2006), a saber:

- (A) degradação do plastificante, perda do Cloreto de Hidrogênio (HCl) da cadeia do polímero e temperatura correspondente;
- (B) Polímero residual e temperatura correspondente,
- (C) Resíduo polimérico carbonáceo, negro de fumo e,
- (D) Cinza.

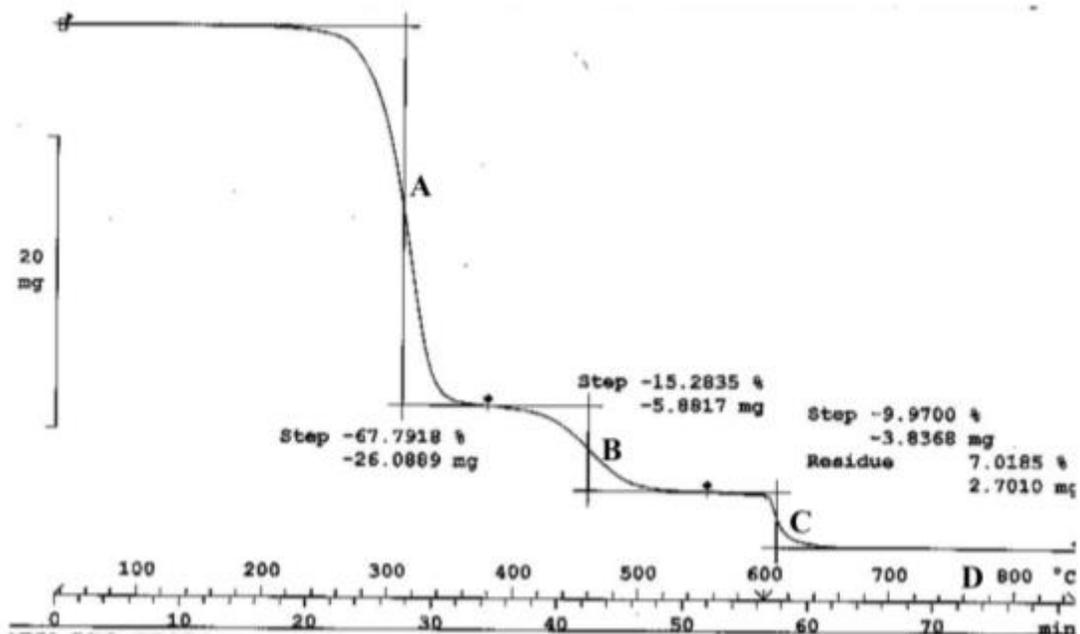


Figura 2-10 – Exemplo dos Parâmetros obtidos do ensaio de TGA para amostra de PVC (COLMANETTI, 2006)

2.4.7 Tempo de oxidação OIT (HDPE)

Este ensaio visa determinar o tempo necessário para que dada amostra de geomembrana seja oxidada sob temperatura e pressão conhecidas e em dado tempo (valor OIT). Portanto, constitui uma medida indireta da concentração dos antioxidantes presentes na amostra (específicos de cada material). Em função das condições de temperatura e pressão, o ensaio pode ser realizado por dois métodos:

- ✓ Ensaio padrão (Std-OIT) tendo como referência a norma ASTM D3895-2007, onde um corpo de prova de 5mg que é submetido à temperatura de 200 °C a uma relação de 20°C/min e pressão de 35kPa em uma atmosfera de nitrogênio.

- ✓ Ensaio de alta pressão (HP-OIT) tendo como referência a norma ASTM D5885-2012, sendo que para este utilizam-se altas e baixas temperaturas. O ensaio é conduzido com uma pressão de 3,4Mpa e uma temperatura de 150°C.

O OIT pode-se ser realizado em métodos diferentes: dinâmicos e isotérmicos. Na análise dinâmica, a amostra é aquecida a uma taxa de aquecimento constante definida, até que se inicie a reação. Na análise isotérmica, o material é previamente aquecido sob atmosfera inerte e, em seguida, mantido a uma temperatura constante durante vários minutos, até se estabelecer o equilíbrio, e subsequentemente exposto a uma atmosfera oxidante (ar ou oxigênio). O intervalo de tempo entre o primeiro contato com o oxigênio até a completa oxidação do material é chamado de Tempo de Oxidação Indutiva (OIT). A Figura 2.11 mostra uma curva típica para o ensaio de OIT.

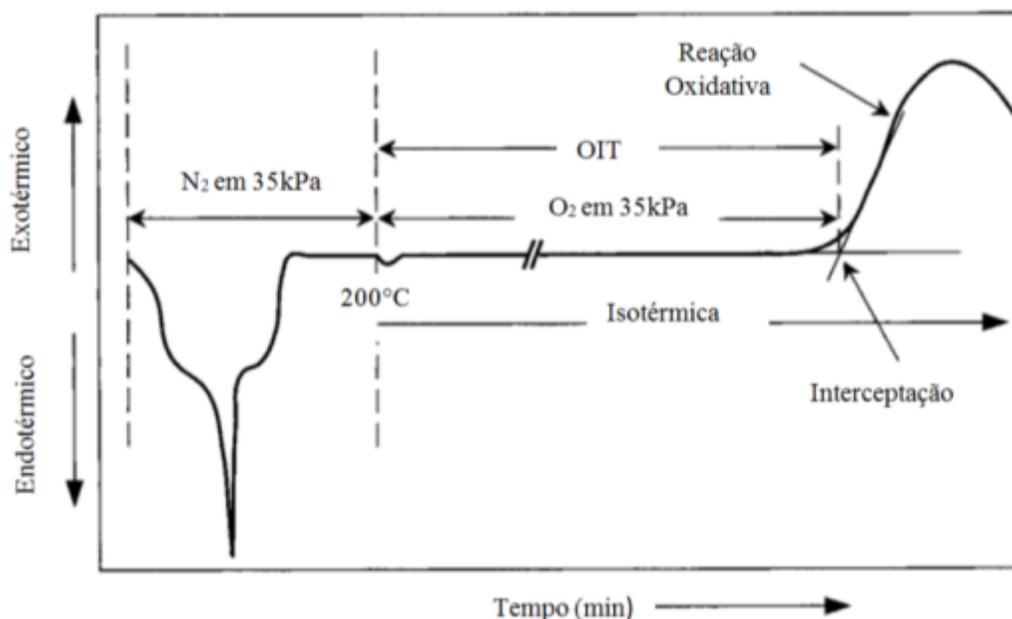


Figura 2.11 – Curva típica de OIT (Adaptado de KOERNER, 2005)

2.4.8 Teor de Negro de Fumo (HDPE)

A análise do Teor de Negro de fumo tem como objetivo verificar se a resina possui a quantidade correta deste pigmento que protege o material da radiação UV. A ASTM 1603-2012 descreve este tipo de determinação como um método que abrange a definição do teor de negro de fumo em polietileno, polipropileno e polibutileno materiais. Determinações de negro de fumo são feitas gravimetricamente após a pirólise da amostra sob atmosfera inerte de nitrogênio. Este método não é aplicável a composições que não contem pigmentos voláteis.

2.4.9 Dispersão Negro de Fumo (HDPE)

A Dispersão Negro de Fumo tem como objetivo verificar se o pigmento está bem disperso. A má dispersão de pigmentos pode levar à falha precoce da geomembrana. A ASTM D3015-1995 descreve exame microscópico de compostos de plástico para verificar a qualidade de dispersão do pigmento. Lâminas finas de polímeros são preparadas para observação em microscópio com luz transmitida. O exame microscópico é normalmente feito para a classificação por comparação contra padrões observacionais.

O método pode ser utilizado para medir o grau de dispersão de pigmentos, a presença de corpos estranhos, os pontos de resina não pigmentada, e a degradação da resina.

2.4.10 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

A análise de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV), não é uma técnica para caracterizar ou testar o desempenho de polímeros, mas tem papel preponderante na avaliação e/ou observação da degradação de materiais poliméricos, pois ela possibilita a análise da estrutura dos polímeros de maneira tridimensional.

O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia. O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm. Como resultado tem-se que os aparelhos modernos permitem aumentos de 300.000 vezes ou mais, para a maior parte de materiais sólidos, conservando a profundidade de campo compatível com a observação de superfícies rugosas. Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica, (NAGATANI et al. 1987).

Devido à necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra, alguns elétrons são absorvidos pela amostra que deve conduzi-los para o fio terra, por isso, é preciso que as amostras sejam

condutoras. Caso isto não ocorra, é possível torná-las condutoras através de vários processos físicos como evaporação ou a deposição de íons. Outro motivo para o recobrimento das amostras, é que as camadas depositadas podem melhorar o nível de emissão de elétrons, pois emitem mais elétrons que o material da amostra, facilitando a construção da imagem. Geralmente o mais utilizado é o recobrimento por deposição de íons metálicos de ouro (Au), liga de ouro-paládio (Au-Pd) ou platina (Pt), entre outros. Neste processo, as amostras são colocadas em uma câmara com pressão em torno de 0,1 a 0,05mbar e o alvo metálico é bombardeado com átomos de gás inerte como, por exemplo, argônio. Os átomos do alvo são depositados sobre a amostra. As máquinas utilizadas para esta finalidade são denominadas metalizadoras, (GOLDSTEIN et al.,1992).

2.4.11 Microscopia de Força Atômica (AFM)

A Microscopia de Varredura de Força (MVF - SFM “Scanning Force Microscopy”) também conhecida como microscopia de força atômica (MFA - AFM “Atomic Force Microscopy”) tem sido utilizada largamente no estudo de polímeros, devido a sua capacidade de fornecer informações que não eram passíveis de se obter com o uso da Microscopia Eletrônica de Varredura. Por conseguir obter imagens de superfície de materiais sob as mais variadas condições (ar, vácuo e em meio líquido) se tornou um dos equipamentos mais completos para estudo de materiais em micro e nano escalas. Apresenta várias vantagens em relação à Microscopia Eletrônica (ME) de Varredura e Eletrônica de Transmissão, para estudo de polímeros, entre elas: dispensar o uso de vácuo ou de recobrimento da amostra, a possibilidade de se realizar medidas diretas de altura e rugosidade, além de, para estruturas ordenadas, poder obter imagens com resolução atômica.

Embora a AFM apresente várias vantagens em relação a ME, quanto à preparação das amostras e obtenção de imagens, ela não pode substituir totalmente esta no estudo de polímeros e deve ser vista como uma técnica complementar, que permite obter várias informações sobre as superfícies dos materiais: a) possibilidade de se realizar medidas em ar e em meio líquido, permitindo a obtenção de imagens de polímeros em seu estado funcional; b) obtenção de imagens com resolução centenas de vezes superior a ME (análise de estruturas na escala nanométrica); c) custo operacional inferior aos microscópios eletrônicos existentes no mercado.

Compreender o princípio de funcionamento do microscópio de força atômica é fundamental para entender sua gama de aplicações. Ele trabalha de forma semelhante a uma agulha de toca-discos

(vinil), onde, no lugar da agulha, se encontra o cantilever, que consiste de uma haste flexível em cuja parte inferior é crescida uma ponta com dimensão de poucas micras. O cantilever possui baixa constante de mola, na faixa de 0,02 a 2N/m, sendo a imagem obtida com a agulha tocando suavemente a amostra (FILHO, 2003).

O sistema de varredura é outro elemento determinante da resolução dos SFM. Este é formado por um sistema de varredura piezoelétrico que gera a movimentação necessária (x, y e z) para obtenção de imagens topográficas nas 3 dimensões e medidas de força. O sistema piezoelétrico é um dispositivo que se move em escala nanométrica/micrométrica quando uma voltagem é aplicada entre seus eletrodos. Os sistemas de varredura são usados também para transladar a amostra até o cantilever ou o cantilever até a amostra. Um sistema de varredura bem construído pode gerar movimentos estáveis em escalas de décimos de Angstrom ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$). Os sistemas de varredura piezoelétricos para AFM podem transladar em três direções de forma a varrer dimensões desde alguns Angstroms até centenas de micra nos eixos X e Y e no eixo vertical Z de décimos de Angstroms a alguns micra, a Figura 2.12 apresenta o diagrama de funcionamento do microscópio e a Figura 2.13 apresenta um detalhe do cantilever (HERRMANN, 1997).

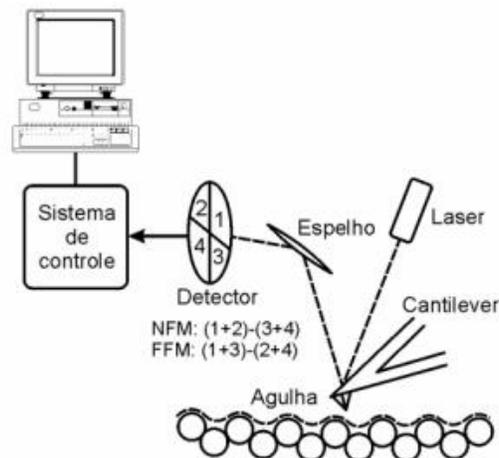


Figura 2.12 – Diagrama de funcionamento do microscópio de varredura de força atômica, (FILHO, 2003)

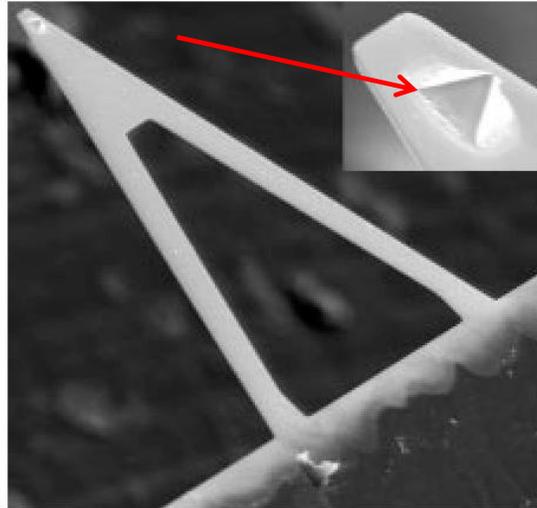


Figura 2.13 – Microscopia eletrônica de varredura de um cantiléver de nitreto de silício com agulha acoplada (HERRMANN, 1997)

Durante as varreduras é gerado um volume de irregularidades mensuráveis sobre a superfície, para isso dá-se o nome de rugosidade. Em um sentido amplo, a rugosidade pode ser definida como a máxima distância entre picos e vales encontrados em um perfil. O descritor estatístico mais empregado no conceito de rugosidade é o valor médio dos desvios das alturas diferentes pontos da topografia em relação à altura média dos pontos, ou seja:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i - Z_m| \quad (1)$$

Onde,

$$Z_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \quad (2)$$

Z_m representa a altura média dos pontos da amostra e Z_i altura de cada ponto da amostra, ou seja, fisicamente a rugosidade representa o quão disperso estão os pontos que compõem a superfície de uma determinada amostra. Se consideramos N alturas onde cada altura pode ser expressa em função da distância, em uma dimensão, podem colocar R_a como:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L |F(x)| dx \quad (3)$$

Onde L é o comprimento varrido projetado, como ilustrado na figura seguinte:

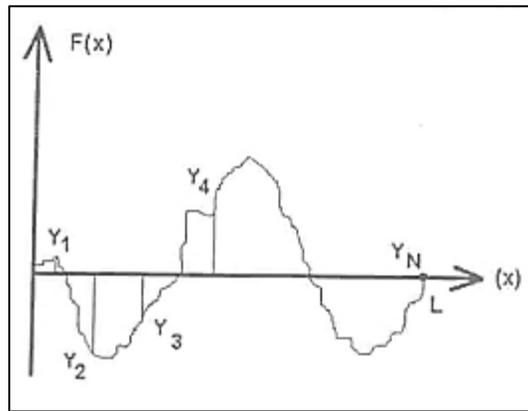


Figura 2.14 – Perfil superficial estabelecido como função (F(X)) da distância (L), como expresso pela equação (3) (FILHO, 1998).

Consequentemente, o desvio médio quadrático, ou seja, a rugosidade RMS, pode ser calculada como:

$$R_q = \left(\frac{1}{L} \int_{x=0}^L F^2(x) dx \right)^{1/2} \quad (4)$$

As equações apresentadas são as básicas utilizadas na caracterização da rugosidade de uma superfície (Filho, 1998).

2.5 Degradação de Geomembranas

2.5.1 Considerações gerais

Degradação é qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que pode ser causada por agentes físicos e/ou por agentes químicos. A degradação causa uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciada pela deterioração progressiva destas propriedades, incluindo o aspecto visual.

Quando os polímeros são expostos ao ambiente, as propriedades originais do material são alteradas em um processo chamado envelhecimento.

Segundo Duncan (2011), existe alguns fatores que aceleração a degradação das geomembranas de HDPE, como: variações diárias da temperatura, umedecimento e secagem alternada da geomembrana, altas temperaturas e degradação hidrolítica.

Rodolfo (2007) destaca que os principais fatores de degradação da geomembrana de PVC são os agentes térmicos e ultravioletas.

2.5.2 Principais tipos de processos de degradação

A seguir apresenta-se uma descrição dos principais tipos de processos de degradação em polímeros.

2.5.2.1 Degradação Biológica

Segundo Koerner (2005) existe uma infinidade de microrganismos nos solos, onde a área de riscos biológicos para geomembrana é vasto e, portanto, citam-se somente as principais:

- Resistência aos animais: a maior preocupação de geomembranas enterradas é a escavação de animais através delas. Estudos na Alemanha tiveram foco em camundongos e grupo de ratos. Tecnicamente somente substâncias mais duras do que o esmalte dos dentes dos roedores ou unhas pode evitar o ataque persistente, portanto as geomembranas são vulneráveis ao ataque desses roedores, mas esse grau ainda é desconhecido.
- Resistência aos fungos: existe diversos tipo de fungos como leveduras e cogumelos. Eles dependem de matéria orgânica como carbono e nitrogênio dentre outros elementos. A estimativa é que exista cerca de 10 a 20 milhões por grama de solo seco e sua população está mudando constantemente. Entretanto polímeros de alto peso molecular parecem ser indiferentes para essa degradação.
- Resistência à bactéria: as bactérias são organismos unicelulares, que estão entre os mais simples e menores formas de vida conhecidos. Essas bactérias raramente ultrapassam o comprimento de 5µm, sua forma pode ser redonda, espiral ou bastonete, a quantidade de bactérias por grama de solo é de aproximadamente 1 bilhão. A grande preocupação a respeito das bactérias não é a degradação polimérica e sim a impregnação e obstrução do sistema de drenagem construído com a geomembrana.

2.5.2.2 Degradação Ultravioleta (UV)

Degradação de UV (fotodegradação) é induzida por irradiação com UV ou luz visível. As consequências da exposição a longo prazo incluem descoloração, fissuras superficiais, fragilidade e deterioração das propriedades mecânicas. A susceptibilidade das geomembranas de HDPE para a degradação de UV é reduzida através da utilização de negro de fumo ou estabilizadores de luz à base de produtos químicos que evitam a luz UV de penetrar a estrutura do polímero. Com respeito à proteção

contra UV supõe-se que uma cobertura de solo de 0,15 m sobre a geomembrana seria suficiente para protegê-lo contra a luz UV (ROWER e SANGAM 2001).

Segundo Jennings e Starnes (2005) a desidrocloreção do PVC forma sequências de políenos conjugados. Estas sequências conferem coloração indesejada ao polímero sempre que o número de duplas ligações conjugadas é suficientemente grande. Estas sequências também são facilmente oxidadas, sofrem foto transformações sob efeito da radiação UV, que se envolvem na formação de ligações cruzadas e servem como fonte de uma série de compostos aromáticos quando a resina é aquecida a temperaturas elevadas, tais como em situações de combustão.

Segundo Koerner (2005), a faixa de comprimentos de ondas dos raios UV que causa grandes danos aos geossintéticos está entre 300 a 370 nm, sendo que o PE é o mais sensível aos raios UV na faixa de 300 nm, seguido do poliéster na faixa de 325 nm e do PP na faixa de 370 nm.

2.5.2.3 Degradação Térmica

A degradação térmica ocorre como resultado da exposição das geomembranas a altas temperaturas. Como as geomembranas são feitas de polímeros varias propriedades podem variar com a mudança de temperatura, ambas as temperaturas quente ou frio podem alterar as propriedades originais (KOERNER, 2005).

Duncan (2011) observa que para ocorrer a degradação térmica nas geomembranas de HDPE necessita-se de oxigênio. Ainda que a temperatura seja importante parâmetro para o controle de velocidade em muitos processos de degradação, a degradação do polímero por energia térmica pura não é um fator crítico em estudos de intempéries. O aumento ou diminuição da temperatura gera dilatação ou contração da membrana, criando rugas quando há um aumento na temperatura e criando tensões quando há uma diminuição da temperatura.

- Altas temperaturas: geomembranas expostas ao calor podem estar sujeitas a mudanças nas propriedades físicas, mecânicas e químicas, a magnitude dessas mudanças é dada em função do tempo de exposição. Algumas normas como ASTM D794 determina os efeitos do calor sobre os plásticos e a ASTM D1870 que preconiza o Método do forno tubular que tem como objetivo a falha devido ao calor, essa falha é definida como a mudança na aparência, peso, dimensão entre outras propriedades que alteram o material para um grau que não é aceitável ao longo da sua utilização (KOERNER, 2005). O aumento na temperatura usualmente conduz a um processo de dilatação do material e reorganização das cadeias (DUNCAN, 2011).

- Baixas temperaturas: Geralmente o frio não degrada as geomembranas de maneira significativa para as baixas temperaturas normalmente encontradas. Testes em diferentes tipos de geomembrana mostraram que não existem efeitos adversos para ciclos de 500 em baixas temperaturas cíclicas (KOERNER, 2005).

Para as geomembranas de PVC, Rodolfo (2007) destaca que dependendo da intensidade e tempo de exposição, pode-se causar a liberação de cloreto de hidrogênio (HCl) acompanhado da formação de sequências poliênicas e ligações cruzadas na cadeia, resultando em um rápido processo de degradação, revelado normalmente pela mudança de coloração para amarelo, até o marrom escuro. Esse processo é conhecido como desidrocloração. A desidrocloração envolve uma reação progressiva entre átomos de cloro e hidrogênio vizinhos ao longo da cadeia polimérica, sendo formada uma ligação dupla entre os átomos de carbono nas posições em que os dois átomos estavam originalmente ligados; forma-se assim uma estrutura de cloro alílico com o próximo átomo de cloro da cadeia polimérica, átomo de cloro este altamente ativado, que dá prosseguimento ao processo de degradação.

2.5.2.4 Degradação Química

Segundo Carvalhosa (2011) a degradação química pode ser provocada pela ação do oxigênio, dos íons metálicos, dos ácidos, das bases e solventes e da água. A perda das propriedades mecânicas de um polímero, resultante da ação dos fatores referidos, depende da sua natureza química. Estes fatores são responsáveis por profundas alterações nas cadeias moleculares constituintes dos polímeros, que incluem quebra de ligações químicas e conseqüente diminuição do comprimento das cadeias moleculares, alteração química das cadeias, incorporação de íons estranhos nas cadeias, formação de espécies quimicamente ativas, rotura das cadeias, etc. Naturalmente, essas alterações profundas acarretam modificações nas propriedades dos polímeros.

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

Segundo KOERNER (2005) os ensaios de resistência química em geomembranas, para condições específicas, necessitam de um número de decisões importantes antes dos testes começarem, a saber: (a) seleção do líquido a ser usado, (b) a maneira correta de incubação da amostra, (c) a maneira correta de ensaiar a amostra e, (d) a avaliação dos resultados. O primeiro item é especificação local. Frequentemente é uma decisão difícil e quando a situação é crítica, decide-se com base no pior caso. Dessa forma, o líquido químico mais agressivo em altas concentrações é usado para a incubação. A incubação das amostras pode ser feita em tanques abertos. Cada vez mais se tem optado por tanques fechados onde se utiliza o método de ensaio 9090 da EPA e o ensaio ASTM D5322 para a avaliação da resistência química da geomembrana. A terceira decisão centra-se no tipo de ensaio a ser utilizado para a avaliação do desempenho da geomembrana após a incubação do líquido. Diferentes escolhas são feitas, mas as seguintes são as mais comuns:

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

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

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

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

MAISONNEUVE ET AL. (1998) verificaram o envelhecimento de duas geomembranas expostas a uma solução aquosa de agentes químicos denominada SIM (Synthetic Immersion Medium). Amostras de HDPE (2,0 mm) e de Polipropileno flexível (fPP) foram imersas no SIM a 23 e 60°C com deformação uniaxial induzida de 5% (HDPE) e de 10% (fPP). O período de análise foi de 8 meses com análises periódicas a cada 2 meses. Os autores concluíram que as análises físico-químicas não evidenciaram fenômeno de envelhecimento nas amostras de HDPE e fPP. Houve apenas uma perda de antioxidantes. As amostras absorveram pequenas quantidades de solventes e apresentaram uma boa resistência às tensões aplicadas.

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

Duncan (2011) destaca que a resistência a fatores ambientais como oxigênio, ozônio, umidade, calor e luz, que trazem essencialmente alterações químicas.

2.5.2.5 Degradação Radioativa

Segundo Koerner (2005) resíduos com níveis de radioatividade maiores que 10^6 a 10^7 rads podem causar degradação nas cadeias poliméricas. Sendo assim a utilização de geomembranas não é recomendável. Entretanto resíduos com baixos níveis de radioatividade pode-se utilizar as geomembranas. Koerner cita Kane & Widmayer (1989) no qual descreve alguns tipos de contenção que podem ser utilizados as geomembranas de HDPE:

- a) Sistemas de impermeabilização de aterros sanitários
- b) Sistemas de cobertura de aterros sanitários
- c) Galerias subterrâneas
- d) Células de descarte de rejeitos de moinho de urânio
- e) Container de alta integridade

2.5.2.6 Degradação por Oxidação

Segundo Needham et al.,(2006) o processo de degradação que tem o efeito mais negativo sobre geomembranas de HDPE enterrada é a oxidação térmica. A oxidação é dependente da temperatura com a taxa de oxidação aumentando rapidamente à medida que a temperatura sobe. Como a oxidação prossegue, as propriedades físicas e mecânicas do polímero começam a mudar eventualmente levando a falha da geomembrana como uma barreira hidráulica eficaz. A oxidação do polietileno pode ser retardada pela adição de estabilizantes adequados, como a resina antioxidante, que funciona com um bloqueador as diversas reações de oxidação. Existem vários tipos de antioxidantes que visam proteger o polímero de diferentes maneiras e em diferentes intervalos de temperatura, como durante o processo de fabricação e toda a vida útil de serviço do *liner*.

Segundo Rowe *et. al.* (2010), a oxidação de um polímero aumenta exponencialmente com a temperatura. O resultado da degradação oxidativa é o colapso das cadeias poliméricas e alterações nas propriedades físicas e mecânicas da geomembrana, que eventualmente gera falhas por ressecamento. Com objetivo de retardar o processo de oxidação os fabricantes acrescentam antioxidantes nas resinas de HDPE durante a fabricação entre acréscimo é da ordem de 0,2 a 0,5% do peso. O processo de

degradação oxidativa pode ser descrito por três etapas, a saber: depleção dos antioxidantes (etapa 1), tempo de indução até o aparecimento da degradação (etapa 2) e da degradação para a falha (etapa 3).

Koerner (2005) afirma que sempre que um radical livre é criado o oxigênio pode gerar uma degradação a longo prazo. O oxigênio quando combinado com radical livre para formar um radical de hidroperoxi, é ligado no interior da estrutura molecular. Eventualmente reações com outras cadeias poliméricas, criam um novo radical livre e causam a ruptura da cadeia. Aditivos antioxidantes são adicionados para eliminar a ação dos radicais livres. Esses aditivos são específicos para cada tipo de resina, com a ação desses ativos o oxigênio é removido da superfície da geomembrana.

2.5.2.7 Degradação Hidrolítica

De acordo com Duncan (2011) o grau de plasticidade em polímeros irá aumentar devido ao longo tempo de exposição à umidade. A água é absorvida, e ocupa o espaço entre as cadeias dos polímeros e causam alterações nas mesmas. Diferenças significativas na concentração da água podem existir de uma região para outra, fato que pode impor tensão adicional sobre o sistema.

2.5.2.8 Efeitos sinérgicos

Os fenômenos de degradação foram descritos individualmente e separadamente, entretanto é provável que dois ou mais mecanismos atuem simultaneamente. Por exemplo, uma geomembrana contaminada com resíduo pode ter chorume anaeróbico acima dela e abaixo oxigênio proveniente um vazamento. Dessa maneira uma degradação química acima e uma degradação oxidativa em baixo estará agindo sobre a geomembrana. Adicionalmente, elevar a temperatura de decomposição do resíduo sólido complicando a situação ainda mais. Avaliando esses vários fenômenos é essencial à previsão da vida útil (KOERNER, 2005).

2.6 Vida útil das geomembranas

Segundo Needham et al. (2006), a vida útil de uma geomembrana de serviço pode ser definido como o período de tempo que o revestimento continua a agir como uma barreira hidráulica eficaz para os fins na qual fora destinada. Sendo que em locais menos sensíveis pode-se aceitar uma maior quantidade de fuga. Dessa maneira a vida de útil em um local menos sensível será mais longo do que em locais ambientalmente vulneráveis. Os danos físicos, degradação do material e tensão de craquelamento (*stress cracking*) gera furos no revestimento que conduzem uma fuga do lixiviado ou gás.

Koerner (2005), afirma que a vida útil das geomembranas é influenciada por mecanismos de degradação individual de temperaturas e tensões relatadas em campo, e agravada pelos efeitos sinérgicos, e que estas não estão fornecendo respostas sobre o comportamento da geomembrana, dessa maneira não sendo suficiente para as tomadas de decisão nos dias atuais. Sendo assim, testes acelerados sejam por alta tensão, altas temperaturas e/ou líquidos agressivos, estão sendo utilizados.

Rowe & Sangam (2002), destacam que a curta história de geomembranas em aplicações de engenharia civil torna difícil à estimativa de sua vida útil. Muitas vezes, a vida útil é estimada com base em testes acelerados em laboratório, utilizando um modelo de previsão de tempo-temperatura conhecido como “A modelagem de Arrhenius” (como descrito por KORNER *et al.*, 1992). Ainda cita que GRAY (1990) comparou dois métodos de envelhecimento acelerado, que também utilizam temperatura elevada para simular a exposição do HDPE em longo prazo. No âmbito internacional existem vários trabalhos sobre envelhecimento acelerado de HDPE e PVC com o objetivo de analisar seu comportamento quando a mesma está degradada e desta maneira presumir a vida útil das membranas.

Newman & Stark (2004) relatam que 1971 foram construídos vinte lagoas em uma universidade no estado de Michigan nos Estados Unidos, dezoito lagoas tiveram fins experimentais na piscicultura e duas para fins de armazenamento de água. As lagoas da pesquisa tinham 30,50m de diâmetro, oito metros de profundidade e taludes com inclinação 1V:3H e, foram revestidas com geomembrana de PVC com espessura de 0,51mm e adicionalmente receberam uma camada de solo arenoso de 0,30m. No ano de 2000 nove lagoas foram limpas onde se observou que nenhuma dela apresentava qualquer tipo de dano físico após quase trinta anos de serviço.

Para verificação das propriedades do *liner* de PVC, exumaram-se três amostras, sendo uma acima da linha d’água, uma abaixo da lamina d’água e uma ultima no fundo da lagoa. Durante a exumação foi possível perceber que as amostras estavam flexíveis e macias, fato que foi evidenciado durante os ensaios de tração simples, pois as mesmas apresentaram comportamento satisfatório do seu alongamento na ruptura e resistência. A amostra que estava no fundo da lagoa apresentou esse comportamento mais pronunciado, provavelmente devido a menor dessecação que ocorre abaixo da linha d’água. O estudo concluiu que o *liner* de PVC de 0,51mm se comportou de maneira muito satisfatória ao longo de 30 anos, pois manteve boa flexibilidade e resistência, além de ter resistido a possíveis ataques biológicos que não foram detectados nos ensaios.

Newman & Stark (2009) ressaltam a preocupação sobre a durabilidade de geomembranas de PVC como revestimento a longo prazo. Uma pesquisa de longo prazo que está em andamento na bacia de decantação em uma mina que está localizada ao norte do Minnesota, tiveram seus taludes revestidos com uma geomembrana com espessura de 0,76mm e estavam submetidas a uma temperatura média de 3°C. A duração da pesquisa é de 30 anos e a frequência de amostragem adotada foi 2, 4, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 anos. O estudo apresentado pelo autor apresenta resultados de 2, 4, 5 e 10 anos.

As amostras de geomembrana de PVC e emendas são exumadas periodicamente na frequência descrita anteriormente e, ensaios para medir os índices e as propriedades de emendas são realizados. Os resultados são comparados com o material especificado existente no momento da instalação, bem como com a especificação da geomembrana de PVC preparados pelo Instituto Geomembrana de PVC (PGI). Verificaram-se algumas propriedades como: espessura, resistência à tração, resistência ao rasgo, migração de plastificantes dentre outros. Todas as propriedades foram satisfatórias, exceto a espessura, fato que pode ser explicado pela alteração na metodologia de ensaio. As propriedades dos materiais medidos em laboratório e em campo quanto à umidade foram comparadas e, indicaram que a condição de umidade de campo é mais representativa no desempenho em campo do que a dessecação em laboratório. Os dados medidos ao longo de um período de dez anos sugerem que a umidade no estado *in situ* pode neutralizar alguns, se não toda a migração de plastificante, que ocorreu durante os ensaios.

Rowe, Sangam & Lake (2002) realizaram uma pesquisa em uma lagoa de captação de lixiviados que incitou sua operação em 1982, sendo posteriormente desativada após 14 anos de serviço. A lagoa estava localizada em Ontario no Canadá, onde as temperaturas no inverno e verão eram de 1 e 25°C respectivamente, sua capacidade de armazenamento era de 2500m³. O aterro possuía taludes com inclinação de 1V:3H, era recoberto com uma camada de 3m de solo silte argiloso, e protegido com uma geomembrana de 1,5mm de HDPE, que fora exposta diretamente com o chorume e acima da linha do chorume ficava a luz solar e a atmosfera.

A GM havia sido usada para armazenar chorume gerado a partir de um aterro industrial, municipal e comercial. O lixiviado continha constituintes típicos inorgânicos incluindo metais pesados. Após o esvaziamento da lagoa observou-se no fundo um lodo preto e rugas na geomembrana em diversos pontos do talude e fundo da lagoa, além de fissuras, furos e remendos. Os autores conjecturaram que as fissuras podem ser atribuídas a tensão de contração térmica elevada ao longo da parte superior ao lado da trincheira de ancoragem onde a geomembrana é completamente impedida de

retrair-se. Algumas dessas fissuras chegavam a 30cm de comprimento, fato que demonstra a alta fragilidade do HDPE contra as fissuras.

Os autores relatam que o número de defeitos (furos, remendos e fissuras) e rugas na geomembrana no momento da desativação, e o perfil de difusão de cloreto através da camada de cobertura sob o *liner* sugerem que ela provavelmente não desempenharia a sua função de projeto por muito tempo. A quantidade de antioxidante medido através do padrão de OIT foi muito pequeno, geralmente menor do que 7 min. O OIT também indicou que os antioxidantes foram quase completamente consumidos na parte exposta da geomembrana, com um valor de OIT próximo de 1 min. Isto sugere que parte da oxidação poderia ter ocorrido, fato que é corroborado pelos baixos valores medidos para as propriedades de ruptura à tração e a resistência ao tensofissuramento. Os resultados também sugerem que o cloreto medido no silte argiloso compactado tinha migrado essencialmente através dos diferentes danos presentes na geomembrana e que a mesma deixou de desempenhar eficazmente a sua função de barreira em um tempo relativamente curto após a instalação. No entanto, como a cobertura de silte argiloso compactado foi de 3 m de espessura, o cloreto tinha difundido apenas 1,70m e, portanto, a falha na geomembrana não causou qualquer impacto adverso sobre as águas subterrâneas.

Segundo Lodi & Bueno (2012), as geomembranas possuem muitas vantagens quando comparadas com materiais convencionais, pois possuem boa resistência a vários tipos de ambientes, no entanto elas podem degradar-se quando expostas aos raios UV e/ou em contato com materiais agressivos. Ainda ressaltam que é difícil prever com exatidão a capacidade de uma geomembrana de manter suas propriedades iniciais ao longo da sua vida útil com base somente nas informações do fabricante.

A radiação ultravioleta associada à temperatura elevada é extremamente nociva aos polímeros, nas geomembranas de HDPE, pode ocorrer à degradação por oxidação ocorrendo à quebra das cadeias moleculares, gerando um processo de degradação de maneira a alterar toda estrutura da molécula de forma a reduzir sua resistência mecânica e o tensofissuramento. Para as de PVC pode ocorrer uma perda de materiais voláteis e plastificantes, resultando no decréscimo no alongamento e aumento da rigidez. Para aumentar-se a resistência das geomembranas são adicionados à matéria prima antioxidantes e estabilizadores UV.

Os autores realizaram o envelhecimento de amostras de HDPE de 0,8 e 2,5mm e PVC de 1 e 2mm de espessura. As mesmas foram expostas a intemperismo e lixiviados, com objetivo avaliar o

processo de degradação sobre a perda total da massa das geomembranas. Para tanto utilizaram a análise termogravimétrica (TGA). Amostras intactas de PVC apresentaram alta composição de plastificante e baixa composição da resina (polímero) sobre os valores da literatura. Após os testes, a perda de plastificantes não foi expressivo para ambos os tipos de exposições, geomembranas expostas aos agentes atmosféricos foi que apresentou a maior variação. Da mesma maneira, as amostras intactas de HDPE também apresentaram composição diferente ao usual. O conteúdo de negro de carbono é muito baixo quando comparado com as especificações. As perdas de massa não foram expressivas, o negro de fumo e cinzas presentes nas amostras expostas também foram baixos. Consequentemente, o resultado é uma menor resistência à degradação oxidativa e aos raios ultravioletas, porque a função do negro de fumo é de retardar o processo oxidativo.

Apesar das análises de TGA apresentarem variações ocorridas nas massas das membranas, os resultados não foram eficientes para detectar o nível de degradação com precisão, entretanto a mesma mostrou-se eficiente para avaliar a composição das amostras.

Touze et. al.(2012), afirmam que os aterros contêm micro poluentes orgânicos, sendo os hidrocarbonetos monoaromáticos, poliaromáticos, solventes clorados, plastificantes, pesticidas e derivados fenólicos são os tipos mais comuns de serem encontrados em lixiviados de chorume. Os compostos fenólicos, especialmente certos derivados de compostos fenólicos halogenados, são conhecidos por serem tóxicos para seres humanos e ao meio ambiente, mesmo em baixas concentrações, estes compostos são utilizados como desinfetantes, conservantes, corantes, pesticidas e produtos químicos orgânicos em medicina e na indústria.

As geomembranas são amplamente utilizadas em aplicações geoambientais onde eles atuam como barreira para a água e contaminantes. Existem vários de estudos sobre o uso de geomembranas focados em difusão de cloreto de sódio ou compostos orgânicos voláteis para geomembranas de HDPE e PVC virgens dentre outras.

A difusão não foi até agora estudado por outro micro poluente orgânico que não seja composto orgânico volátil, portanto, o objetivo deste trabalho foi apresentar os resultados obtidos ao estudar a difusão de fenol, por meio de uma geomembrana de HDPE virgem. O estudo foi realizado com uma geomembrana de HDPE de 2mm de espessura que representa a maioria das geomembranas de HDPE encontradas em *liners* de fundo nos aterro da Europa.

O método de permeação/difusão consiste em uma célula de vidro de 12cm divididas em dois compartimentos e separadas por uma geomembrana, a célula é posicionada na horizontal enquanto os

testes são realizados, este tipo de método simula o processo de transporte que é esperado em uma aplicação de aterro do que os testes de imersão/absorção.

Os resultados são em comparação com os resultados obtidos anteriormente para compostos orgânicos voláteis e tendências apresentadas na literatura no que se refere à evolução do coeficiente de difusão, coeficiente de partição e permeação com o coeficiente de solubilidade em água, a água octanol, o diâmetro molecular, e o molecular peso. Os resultados mostraram que a geomembrana se comportou de maneira satisfatória ao diversos tipos de partições utilizadas.

Lodi (2003) destaca que existem inúmeros trabalhos que tratam de métodos de previsão de vida útil de geomembrana de HDPE, mas que efetivamente esses métodos poderão ser validados após a obra ter atingido sua vida útil. Ainda afirma que a degradação das geomembranas envolvem diversos fatores que dificultam suas análises mesmo em curto prazo e que sua avaliação a longo prazo ainda não possui uma explicação técnica razoável. Ele ressalta ainda que os efeitos degradativos avaliados em laboratório muitas das vezes são superestimados e geralmente não refletem a realidade de exposição no campo. Outro fator é o aumento ou diminuição nas propriedades que podem ter causas múltiplas incluindo a anisotropia do material.

Com base ao exposto percebe-se que a vida útil de uma geomembrana está diretamente ligada ao meio na qual ela está inserida, os processos de degradação podem ser potencializados por diversos fatores que vão desde a composição das geomembranas até os efeitos sinérgicos impostos sobre ela, portanto simular a degradação das geomembranas em laboratório e estimar sua vida útil é uma tarefa árdua e complexa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem como objetivo descrever os materiais, métodos e equipamentos utilizados para realização dos ensaios com as geomembranas, tais como: espessura, densidade, resistência à tração simples, termogravimetria e microscopia eletrônica de varredura. Os mesmos foram executados em amostras virgens, exumadas em campo e envelhecidas em laboratório.

3.1 Materiais

3.1.1 Geomembranas

As geomembranas utilizadas na pesquisa foram geomembranas de HDPE e de PVC, oriundas dos principais fabricantes brasileiros. Na Tabela 3-1 são apresentadas as especificações das geomembranas utilizadas nesta pesquisa e que foram obtidas dos catálogos dos fabricantes. A Tabela 3-2 apresenta os tipos de geomembranas e a respectiva nomenclatura usada para designá-las na pesquisa.

Tabela 3-1 – Especificação das geomembranas usadas na pesquisa.

Tipos	Fabricante	Espessura (mm) ⁽¹⁾	Resistência à Tração (MPa) ⁽²⁾		Alongamento (%)	
			Escoamento	Ruptura	Escoamento	Ruptura
HDPE	A	1,50	22	25	13	400
PVC	B	0,76 a 0,84	-	14,70	-	370
PVC	C	0,75 a 0,85	-	7	-	200
PVC	D	0,80	-	16	-	450

Nota: (1) e (2) – são dados retirados dos catálogos dos fabricantes e não foram comprovadas por laboratório independente

Tabela 3-2 – Tipos, fabricantes e nomenclaturas usadas para a identificação das geomembranas e respectivos locais de aplicação.

Geomembrana	Mineração
GM-A1 e GM-A2	Mineração Fazenda Brasileiro
GM-A3	Mineração Jacobina
GM-B, C e D	Mineração Fazenda Brasileiro

A pesquisa foi realizada analisando-se quatro grupos diferentes de amostras, que são apresentados na Figura 3-1 a seguir:

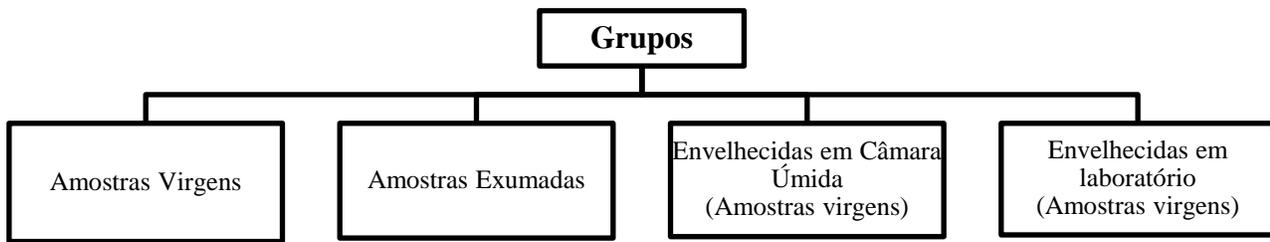


Figura 3-1 - Esquema dos grupos de estudo

Para melhor identificação e controle dos ensaios adotaram-se as nomenclaturas, conforme a origem das amostras. A tabela a seguir apresenta a identificação das amostras.

Tabela 3-3 – Nomenclaturas usadas para a identificação dos grupos de amostras

Geomembranas	Nomenclatura
Geomembrana Virgem	GMV
Geomembrana Exumada	GMEX
Geomembrana Envelhecidas em Câmara Úmida	GME
Geomembrana Envelhecidas em Ensaio de Durabilidade	GMD

As geomembranas exumadas em campo estavam instaladas no dique de segurança e nos reservatórios dos lagos da Mineradora Fazenda Brasileiro S/A sendo que, todas elas estavam expostas às intempéries, como grandes variações de temperaturas locais (15 a 45°C), raios U.V, e contato direto com o fluido a base de cianeto, com variações de pH da ordem de 7. Dois tipos de geomembranas foram exumadas: duas de Polietileno de Alta Densidade (HDPE) e três de Policloreto de Vinila (PVC). A tabela a seguir apresenta as características básicas das geomembranas exumadas:

Tabela 3-4 – Características básicas das geomembranas exumadas

Geomembrana	Tipo de superfície	Espessura (mm)
GMEX-A	Texturizada (uma face)	1,50
GMEX -B	Lisa	0,80
GMEX-C	Lisa	0,80
GMEX-D	Lisa	0,80

As amostras de geomembranas virgens foram submetidas a ensaios de caracterização e durabilidade. Os ensaios de caracterização foram:

- Determinação da espessura média (ASTM D5199 e D5994)
- Densidade (ASTM D792)
- Ensaio de Tração (ASTM D882)
- Análise Termogravimétrica (Determinação da Perda de Massa) (ASTM D6370)
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia de Força Atômica (AFM) com análise 3D e determinação da rugosidade.

Os ensaios de durabilidade realizaram-se através de uma simulação em laboratório com a submersão das amostras virgens no fluido retirado da barragem sob condições de temperatura elevadas e exposição aos raios U.V. por seis meses e câmara úmida sob condições de umedecimento e temperatura constantes de 40°C. As amostras de geomembranas exumadas, aquelas retiradas dos ensaios de durabilidade e de envelhecimento em câmara úmida, também foram submetidas a ensaios de caracterização descritos acima. A Tabela 3-5 apresenta uma síntese dos ensaios realizados na pesquisa.

O envelhecimento das amostras de geomembranas foi efetuado primeiramente por meio de uma caixa hermeticamente fechada onde as amostras foram submergidas no líquido cianetado das barragens sob condições similares às de campo (pH, radiação infravermelha 40° C e radiação ultravioleta). Em outra etapa, as amostras foram confinadas em câmara úmida à temperatura de 40°C (temperatura e umidade) durante 3000 horas. Na Tabela 3-6 são mostrados os processos de envelhecimento e respectivos períodos de confinamento.

Tabela 3-5 – Descrição e quantidade de ensaios realizados

Amostras	Caracterização	RTS	TGA	MEV	AFM
Virgens	24	20	4	4	1
Exumadas	30	25	6	6	1
Envelhecimento Câmara Úmida	80 ⁽¹⁾	80	4	8	-
Envelhecimento Ensaio Durabilidade	96 ⁽²⁾	80	4	8	-
TOTAL	230	205	10	26	2

Notas: (1) Para as amostras que foram envelhecidas na câmara úmida a caracterização foi realizada somente antes do envelhecimento;

(2) Para as amostras envelhecidas no ensaio de durabilidade a caracterização foi realizada antes e depois do envelhecimento;

Tabela 3-6 - Processos de envelhecimento e períodos de análise

Processo de Envelhecimento	Períodos de exposição (dias)	Procedimentos utilizados
Envelhecimento em câmara úmida	21/42/67/83	50184 (FIAT)
Envelhecimento em ensaios de durabilidade	20/60/120/180	ASTM D5322

3.1.2 Fluido cianetado

O fluido utilizado para a exposição da GM foi coletado no Lago III, que compõe a estrutura do barramento. O fluido é originário do processo de beneficiamento do minério, e em sua composição está presente o cianeto de sódio. Em análises realizadas no mesmo detectou-se a quantidade de 0,86mg/L e 1,39mg/L de cianeto livre e total respectivamente, além do cianeto foi detectada a presença de arsênio, amônia, cloreto e sulfato. No APÊNDICE D, apresenta-se a análise química realizada para caracterizar o fluido.

3.1.3 Preparação das amostras

As amostras de geomembranas virgens foram cortadas com dimensão de 15x10cm e colocadas em imersão no fluido sendo as mesmas monitoradas por variados intervalos de tempos. O monitoramento tem como objetivo medir a temperatura ao longo dos meses e, observar o comportamento físico e químico das amostras e do fluido. Na Figura 3-2 é apresentado o armazenamento do fluido após a coleta no Lago III.



Figura 3-2 – Armazenamento do fluido do Lago III em containers no Laboratório da UFMG.

3.2 Descrição das áreas de estudo utilizadas

3.2.1 Introdução

O Brasil tem tradicionalmente ocupado uma posição de destaque na produção mundial de ouro. Durante o ciclo do ouro, entre 1700 e 1850, o Brasil foi o maior produtor mundial chegando a produzir 16 toneladas anuais, provenientes principalmente de aluviões e outros depósitos superficiais explorados pelos Bandeirantes na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Foi também nesta região que se instalou a primeira mina subterrânea do Brasil, Mina de Morro Velho. Desde o início de sua operação em 1834, até 1988 produziu-se 470 toneladas de ouro representando 25% da produção brasileira acumulada no mesmo período. Uma estimativa das reservas brasileiras de ouro é difícil visto que a maioria dos depósitos conhecidos não tem suas reservas convenientemente avaliadas exceto aquelas que estão em produção ou de posse de empresas de mineração, (Lobato *et al.*, 2001).

O ouro é um tipo de mineral que é bastante valorizado e procurado não apenas para a produção de joias, mas também devido a várias aplicações industriais e comerciais. Suas características físicas, tais como alto índice de flexibilidade, resistência à corrosão, alta condutibilidade elétrica e a grande capacidade de refletir calor fazem com que ele seja cada vez mais utilizado nas indústrias eletrônicas e elétricas. As principais aplicações para o ouro são:

- ✓ O ouro exerce funções críticas em computadores, comunicações, naves espaciais, motores de reação na aviação, e em diversos outros produtos.
- ✓ A sua elevada condutividade elétrica e resistência à oxidação têm permitido um amplo uso em eletrodeposição, ou seja, cobrir com uma camada de ouro por meio eletrolítico as superfícies de conexões elétricas, para assegurar uma conexão de baixa resistência elétrica e livre do ataque químico do meio. O mesmo processo pode ser utilizado para a douragem de peças, aumentando a sua beleza e valor.
- ✓ Como a prata, o ouro pode formar com o mercúrio que, algumas vezes, é empregado em restaurações dentárias.
- ✓ É empregado para o recobrimento de materiais biológicos, permitindo a visualização através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).
- ✓ Utilizado como cobertura protetora em muitos satélites porque é um bom refletor de luz infravermelha

3.2.2 Mineração Fazenda Brasileiro S.A

A Mineração Fazenda Brasileiro S/A (MFB) de propriedade da empresa Yamana Gold está localizada no município de Barrocas, Estado da Bahia a aproximadamente 215 km da cidade de Salvador, com coordenadas geográficas aproximadas: latitude UTM N 8.733.833,54 m e longitude UTM E 491.142,61 m (Figura 3.3). Consiste em uma mina subterrânea de ouro que tem uma produção de 3.500 toneladas por dia de carbono-em-polpa. A mina está em produção há mais de 20 anos. A Yamana Gold adquiriu a operação em 2003, quando suas reservas minerais indicaram uma vida útil da mina de apenas dois anos e meio.

Duas novas zonas mineralizadas, CLX2 e Lagoa do Gato, foram descobertas em 2009 e, uma campanha geológica confirmou a continuidade da mineralização em ambas as áreas. A zona CLX2 tem um potencial significativo nas fontes com alto grau de minério na mina. Áreas de alto grau da região são facilmente acessíveis a partir da mina principal. O trabalho continua com o objetivo de aumentar as reservas minerais e recursos minerais. Em 2013 a mina produziu cerca de 1990 kg de ouro (YAMANA GOLD, 2014).

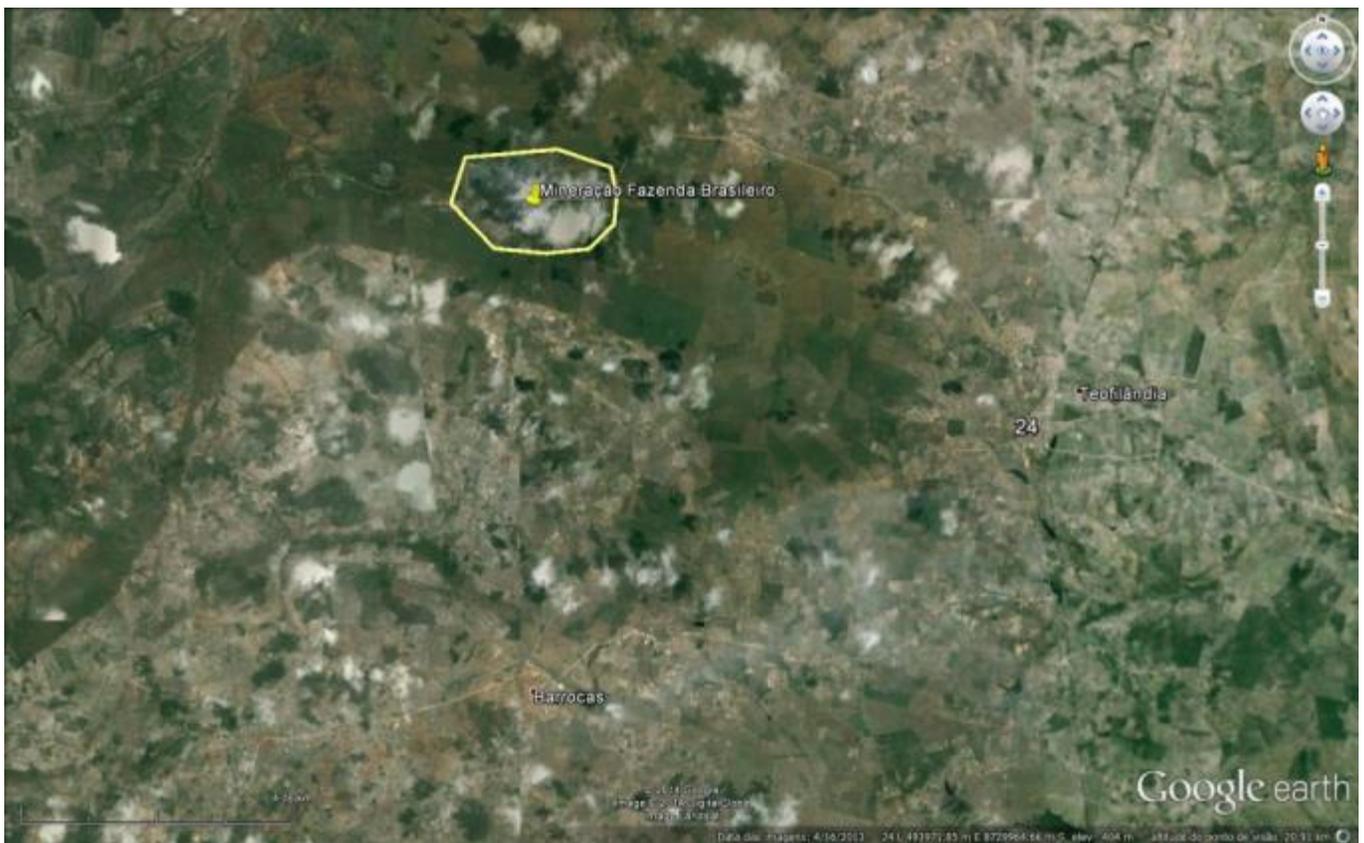


Figura 3.3 - Localização da Mineração Fazenda Brasileiro

3.2.2.1 Processo produtivo

Para o ouro ser extraído ele precisa passar por um processo de beneficiamento do minério que visa à separação do ouro dos demais elementos minerais, a partir de uma série de operações físico-químicas.

O minério detonado que vem da Mina é transportado até a Usina onde o seu tamanho é reduzido quando passa por equipamentos chamados britadores e moinhos. Depois dos moinhos o minério junto com a água (polpa) é enviado para tanques de agitação, onde é adicionado a ele o cianeto para que o mesmo possa extrair o ouro presente na polpa. Nestes tanques também é adicionado um carvão especial que armazena o material rico que depois é enviado para o forno onde é obtido o produto final. O rejeito (material pobre) é bombeado para a barragem de rejeitos. Essa barragem é revestida com uma manta de geomembrana que evita o contato da polpa cianetada com o meio ambiente. A Figura 3.4 mostra um esquema do processo produtivo.

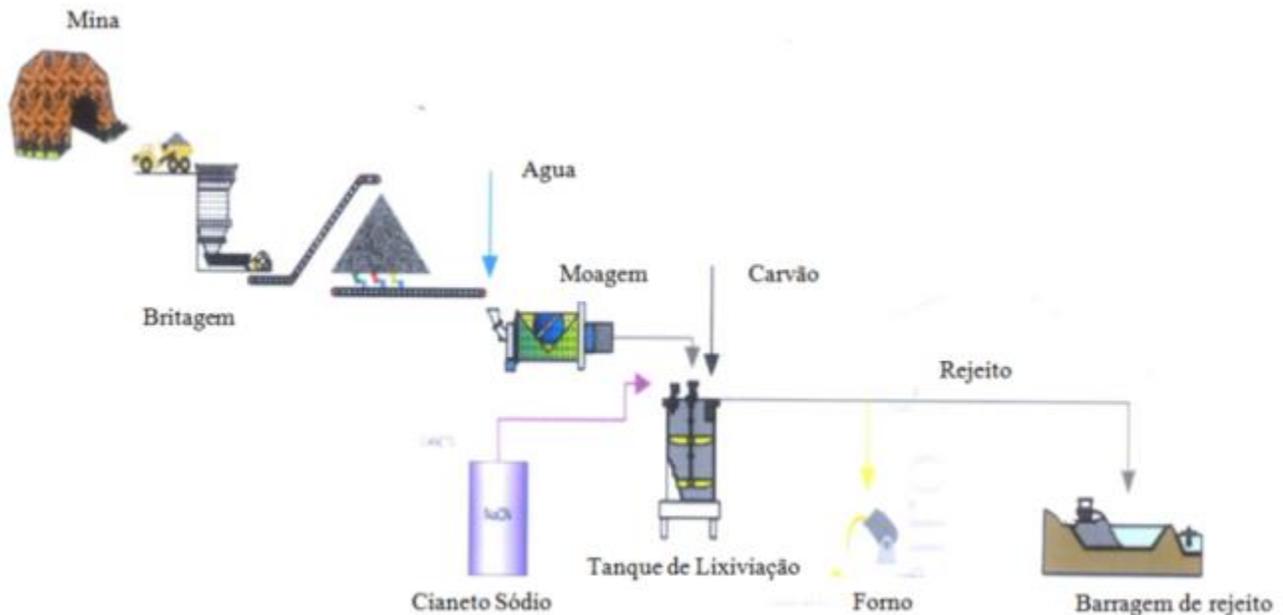


Figura 3.4 - Esquema do Processo Produtivo

3.2.2.2 Descrição do Sistema de Disposição de Rejeitos

O sistema de disposição de rejeitos da MFB destina-se a receber rejeitos gerados pelo beneficiamento de minério de ouro. Atualmente o Sistema de Disposição de rejeitos é constituído por três lagos: Lago I (original), Lago II (a jusante do Lago I) e Lago III (a montante do Lago I) - situada na porção mais alta do vale.

A operação do sistema consiste basicamente em bombear o rejeito total da usina até o Lago I, sendo o mesmo submetido ao processo de ciclonação, no qual ocorre a partição dos rejeitos em “underflow” (parcela mais grossa) e “overflow” (parcela mais fina). O “underflow” gerado é disposto em pilha no Lago I e o “overflow” lançado no Lago III, que também recebe o sobrenadante do Lago II. Foi implantado um novo dique a jusante do sistema de disposição de rejeitos intitulado Dique IV, locado a jusante do Dique de Segurança existente.

Essa nova estrutura foi implantada como parte da expansão do sistema para atender à geração de rejeitos entre os anos 2014 a 2018 e passará a receber o “overflow” após o esgotamento da disponibilidade de volume e área no Lago III, (PIMENTA DE AVILA, 2013).

Figura 3.5 apresenta o *layout* do sistema.

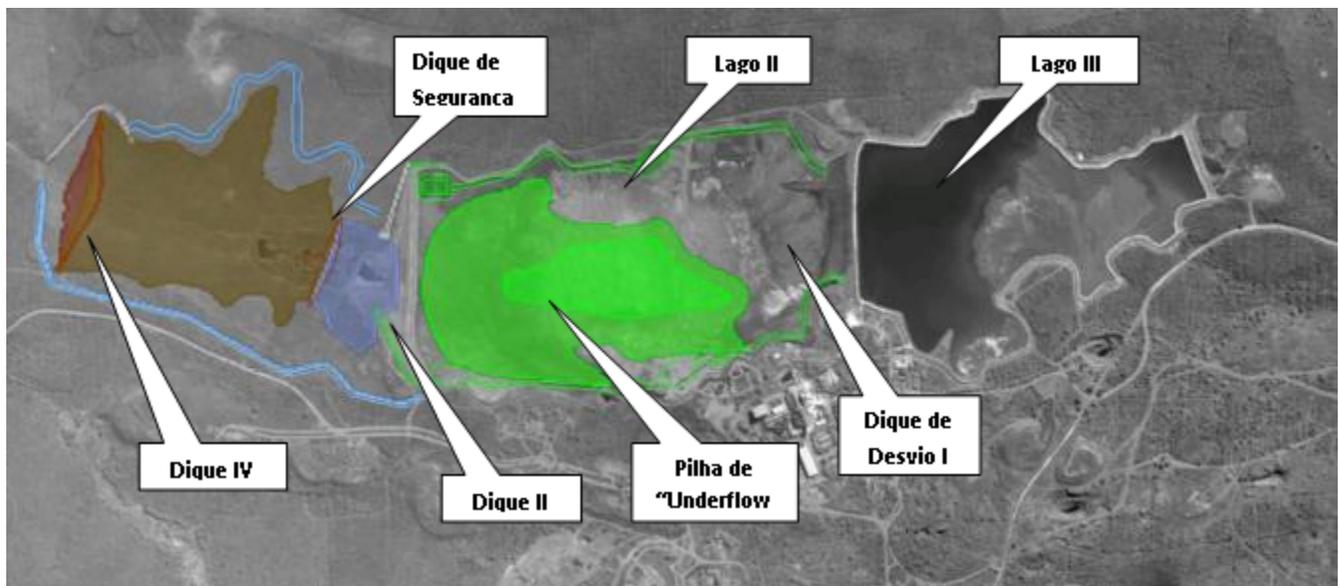


Figura 3.5 - Sistema de Disposição de Rejeitos MFB

3.2.2.3 Descrição do Sistema de Impermeabilização dos Reservatórios

O sistema de disposição de rejeitos em sua totalidade é dotado de sistema de drenagem superficial, sistema extravasor, canal periférico e reservatório revestido em geomembrana.

Os rejeitos possuem elementos contaminantes ao meio ambiente, entre outros arsênio e cianeto, e por este motivo devem ser armazenado apropriadamente. Sendo assim os reservatórios de disposição de rejeitos são impermeabilizados com geomembranas de HDPE e PVC, com 1,5mm e 0,80mm respectivamente. A Figura 3-6 à Figura 3-8 apresentam detalhes típicos da instalação da geomembrana nos reservatórios.

Visando garantir que toda a água sob a geomembrana seja drenada, e conseqüentemente evitar a elevação ou o surgimento de subpressões, a estrutura foi dotada de um dreno de fundo tipo espinha de peixe, composto por um dreno principal e 6 drenos secundários. O dreno principal apresenta seção trapezoidal de 1,5m de base inferior, paredes com inclinação igual a 1V:1H e 1,6m de altura. O dreno principal fora projetado da seguinte maneira: manteve-se o núcleo drenante em brita 3 (diâmetro 22 a 62mm) com um tubo perfurado de diâmetro igual a 170mm posicionado no seu interior. Externamente, o núcleo é envolvido por uma camada de 0,20m de brita 2 (diâmetro 22 a 32mm). Este conjunto, que mantém as mesmas dimensões do dreno de montante para uma perfeita interligação, foi envelopado com geotêxtil. Por fim, uma camada de areia entre o geotêxtil e o solo de fundação, com espessura de 0,20m, foi também implantada.

Os drenos secundários apresentam também seção trapezoidal de 0,85m de base inferior, paredes com inclinação igual a 1V:1H e 1,1m de altura . A mesma premissa do dreno principal foi adotada na concepção dos drenos secundários, com a diferença de que o núcleo drenante será constituído unicamente por brita 2.

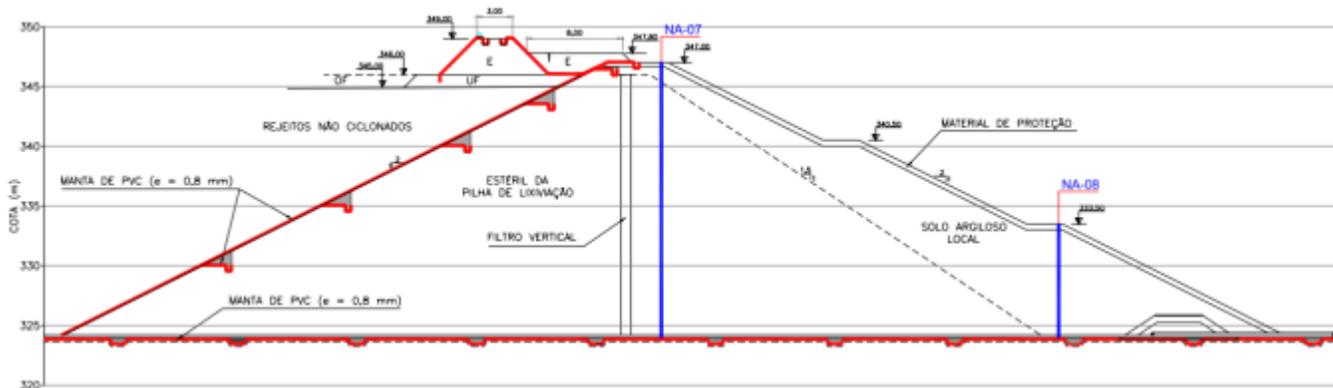


Figura 3-6 - Seção típica do Dique II – Impermeabilização a montante e fundação com GM PVC 0,80mm

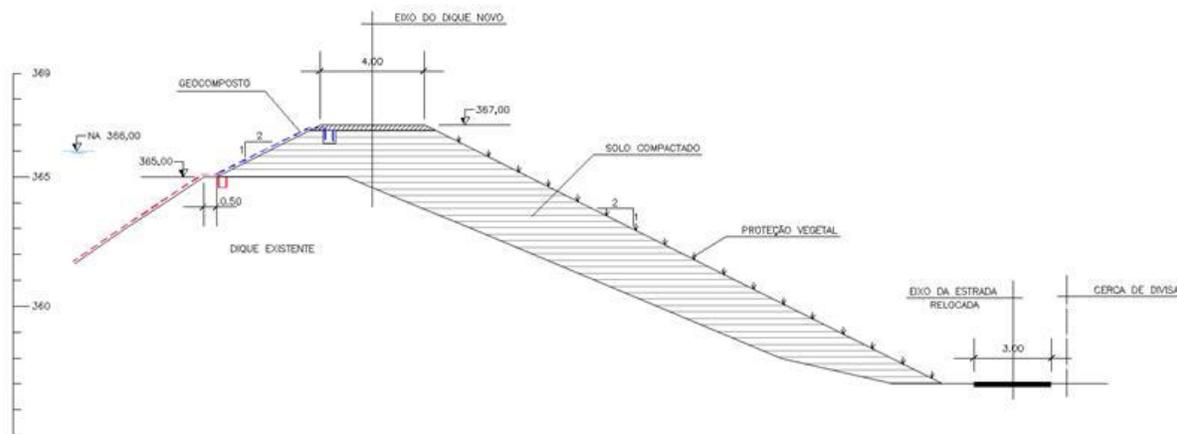


Figura 3-7 - Seção típica do Lago III – Impermeabilização a montante com GM PVC 0,80mm

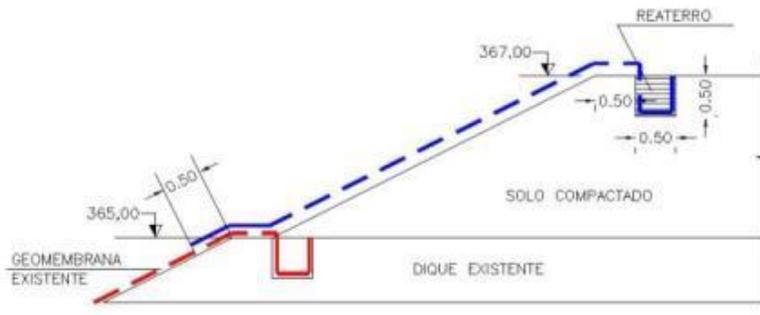


Figura 3-8 – Detalhe de sobreposição de geomembrana existente com nova a ser instalada

As figuras a seguir apresentam imagens dos lagos em algumas etapas como: construção, operação e exumação das amostras para o estudo de durabilidade.



Figura 3-9 – Lago II – Vista do reservatório e espaldares revestidos com GM de PVC



Figura 3-10 – Lago II – Vista do reservatório e espaldares revestidos com GM de PVC



Figura 3-11 – Vista do Lago II desde o Dique II



Figura 3-12 – Lago II - Espaldares revestidos com GM de PVC



Figura 3-13 – Lago II – Exumação da amostra de GM de PVC



Figura 3-14 – Dique de segurança – Instalação da geomembrana de HDPE



Figura 3-15 – Dique de segurança – Vista HDPE em operação – Ao fundo percebe-se o percolado de cianeto proveniente dos drenos do Lago II



Figura 3-16 – Dique de segurança – Exumação de amostra –Nota-se a saída do percolado de cianeto dos drenos de fundo do Lago II



Figura 3-17 – Lago III – Detalhe da colocação da GM de PVC sobre o talude



Figura 3-18 – Lago III – Detalhe da ancoragem provisória para instalação (GM de PVC)



Figura 3-19 – Lago III – Acabamento do talude antes da colocação da GM de PVC



Figura 3-20 – Lago III – Vista da GM de PVC instalada

3.2.3 Barragem de rejeito Jacobina

A barragem de rejeitos de Jacobina, de propriedade da JMC, está localizada no riacho Santo Antônio no município de Jacobina (BA), a cerca de 330 km da cidade de Salvador. A mesma foi implantada a jusante da barragem B1, conforme Figura 3-21, cujo reservatório encontrava-se em processo de exaustão. (SAMPAIO, 2013).



Figura 3-21 – Vista da barragem B1 e da barragem Nova (GOOGLE EARTH, 2008 apud SAMPAIO 2013).

A barragem, com dique de partida concluído em maio de 2010, tem por finalidade armazenar os rejeitos gerados durante os próximos 20 anos de operação da mina, tendo sido previsto o processamento de aproximadamente 2,4 milhões de t/ano de minério de ouro, com alimentação média de 6.500 t/dia. A barragem será construída em sete etapas, com alteamentos para jusante. A capacidade final de armazenamento do reservatório será de aproximadamente 27.000.000 m³. O volume total do maciço da barragem será da ordem de 14.700.000 m³, onde 14.000.000 m³ serão constituídos por underflow. O maciço final da barragem apresentará desnível máximo de 115,0m.

Para evitar a contaminação do solo e do lençol freático, o reservatório, a fundação e o talude de montante da barragem foram impermeabilizados com a utilização de geomembrana de PEAD com 1,5mm de espessura texturizada em uma face. Na Figura 3-22 é apresentada a vista geral da barragem de Jacobina na 1ª etapa de construção. (SAMPAIO, 2013)



Figura 3-22 – Vista geral da barragem de Jacobina 1ª etapa (DAM, 2010 apud SAMPAIO, 2013).

3.3 Métodos adotados para os ensaios

3.3.1 Procedimento para a exumação de amostras

As amostras exumadas foram extraídas nos lagos de contenção de rejeitos e diques de segurança que compõem a estrutura do barramento. Além das amostras exumadas na Mineradora Fazenda Brasileiro S/A, exumou-se adicionalmente uma amostra de HDPE de 1,50 mm de espessura na barragem Jacobina Mineração e Comércio Ltda. Na Tabela 3-7 são apresentados os locais onde as mesmas foram extraídas.

O critério para a exumação foi: amostras expostas as intempéries; amostras em contato ou não com o percolado de cianeto; e, amostras que não estivessem em contato com o rejeito.

Para a retirada das amostras no laboratório, levou-se em consideração o sentido que as mesmas foram instaladas na obra, ou seja, no sentido longitudinal. Essa ação visa garantir que o ensaio de

tração simples seja realizado no mesmo que sentido em que foi instalada no campo, dessa maneira submete-se a amostra ao mesmo estado de tensão do campo.

A instalação das geomembranas de HDPE e PVC ocorreram no período dos anos 2006 a 2011.

Nas Figura 3-23 a 3-29 são mostrados os locais onde as amostras foram exumadas.

Tabela 3-7 - Local de extração das amostras nas barragens.

Local	Ano instalação	Dados amostra				Coordenadas Geográficas	
		Código amostra	Tipo GM	Espessura (mm)	Condição de exposição	Latitude	Longitude
Dique segurança	2010	GMEX-A1	HDPE	1,50	Em contato com fluído cianetado proveniente dos drenos lago I e II	11°26'59,87"	39°5'26,2"
Dique segurança	2010	GMEX-A2	HDPE	1,50	Sem contato com fluído	11°27'0,25"	39°5'25,88"
Barragem Jacobina ⁽¹⁾	-	GMEX-A3	HDPE	1,50	-	-	-
Lago III	2009	GMEX-B	PVC	0,80	Sem contato com fluído	11°27'5,31"	39°4'40,36"
Lago III	2011	GMEX-C	PVC	0,80	Sem contato com fluído	11°27'5,17"	39°4'40,72"
Lago II	2006	GMEX-D	PVC	0,80	Sem contato com fluído	11°27'8,58"	39°5'3,34"

Nota: (1) – Somente a referida amostra foi exumada da Jacobina Mineração e Comércio Ltda.

(2) – Todas as geomembranas foram exumadas no dia 24/05/2013, exceto a de Jacobina Mineração Jacobina Mineração e Comércio Ltda.



Figura 3-23 – Local da exumação das amostras



Figura 3-24 – Dique de segurança – Local da exumação das amostras de HDPE



(a) Amostra GMEX-A1

(b) Amostra GMEX-A2

Figura 3-25 – Dique de segurança – Exumação da amostra de HDPE



Figura 3-26 – Lago II – Vista do reservatório (Lago II)



Figura 3-27 – Lago II – Exumação da amostra de PVC – Amostra GMEX-D



Figura 3-28 – Lago III – Exumação da amostra de PVC – GMEX-B e GMEX-C



Figura 3-29 – Lago II – Exumação amostra de PVC

3.3.2 Envelhecimento em Câmara Úmida

Para a realização do envelhecimento em Câmara Úmida utilizou-se o equipamento do fabricante Corrotest. O equipamento produz uma atmosfera saturada de umidade compreendida entre 95 a 100% com condensação contínua sobre os corpos de prova. Tal equipamento é constituído de uma câmara construída em material resistente à corrosão com uma porta estanque. O sistema de exposição dos corpos de prova permite que suas faces permaneçam expostas e, sobre estas não ocorra o gotejamento da umidade condensada. O aquecimento da água desmineralizada contida na câmara é regulado por um termostato e as temperaturas por termômetros com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. A câmara contém também um dispositivo que mantém constante o nível de água e uma circulação de ar constante em seu interior. Os corpos de prova são dispostos na câmara de modo que não façam contato entre si e com as paredes da câmara. A temperatura do ensaio é de $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$. A Figura 3-30 mostra os corpos de prova durante o ensaio.

Os corpos de prova foram submetidos à exposição em períodos de 21, 42, 84 e 125 dias, em um ambiente com temperatura e umidade controlada. Este é um método de ensaio comumente empregado

para realizar provas ambientais destinadas a evidenciar eventual decaimento das características físicas e/ou funcionais de materiais.



Figura 3-30 - Vista geral da câmara úmida – Fabricante *Corrotest CE300*

3.3.3 Envelhecimento em ensaios de durabilidade

Para o estudo do envelhecimento em ensaio de durabilidade, com radiação ultravioleta, radiação infravermelha (40°) e imersão em fluido cianetado, foi desenvolvido um equipamento que simula, simultaneamente, em laboratório, os efeitos dos raios solares na faixa UV e infravermelho bem como a imersão das amostras em fluido cianetado. O objetivo foi submetê-las às condições encontradas no campo. Os procedimentos para a montagem do equipamento e a realização dos ensaios foram norteados conforme orientações e sugestões da norma ASTM D5322 e D5496.

As amostras são expostas aos raios UV e infravermelho. A fonte UV consiste em um arranjo de lâmpadas fluorescentes com emissão de luz na faixa UV-B. Com relação ao equipamento, a ASTM D5322 faz referência a um material resistente à corrosão, um recipiente com o fluido e controladores de temperatura para que as mesmas estejam na faixa entre 23 a 50°C. As características dessas lâmpadas são: fluorescentes na faixa UV-B (280nm a 315nm) com pico de emissão a 313nm, comprimento de 1220 mm, potência de 40 watts e corrente elétrica de 430mA a 102V.

O fluido na qual as amostras foram imersas fora coletado do Lago III que compõe a estrutura do barramento, o fluido é originado do processo de beneficiamento do minério, e em sua composição está presente o cianeto de sódio. Em análises realizadas no fluido detectou-se a quantidade de 0,86mg/L e 1,39mg/L de cianeto livre e total respectivamente.

Os períodos de análise foram de 30, 60, 120 e 180 dias, sendo que para cada período foram retiradas amostras para a realização dos ensaios de acordo com a Tabela 3-5. A quantidade de amostras em cada retirada foi de seis por fabricante, sempre após as retiradas as amostras foram lavadas em água corrente e secas em capela, para então proceder-se com os ensaios indicados na Tabela 3-5.

As Figuras seguintes ilustram o equipamento no laboratório de Geotecnia da Escola de Engenharia da Universidade de Minas Gerais.



Figura 3-31 – Caixa para imersão das amostras



Figura 3-32–Imersão das amostras no fluido cianetado para ensaios de durabilidade.

3.3.4 Equipamentos utilizados para os Ensaios físicos e mecânicos

3.3.5 Ensaio de tração

Para a realização dos ensaios de tração utilizou-se os as prensas dos fabricantes EMIC e INSTRON. Os equipamentos para a realização desses ensaios (Figura 3-33 e Figura 3-34) são prensas de tração servo controladas com medidores de deslocamento do tipo LVDT com software que permite a aquisição e armazenamento diretamente dos resultados obtidos via interface gráfica a um microcomputador acoplado ao sistema. Para a realização dos ensaios de tração as amostras possuíam dimensões de 15x10cm.



Figura 3-33 – Prensa tração do fabricante EMIC



Figura 3-34 – Prensa tração do fabricante INSTRON

Os ensaios de tração foram efetuados como ensaios índices, portanto, o tamanho do corpo de prova foi arbitrado em 15x10cm. Como referência utilizou-se a norma ASTM D882-2012 para o PVC, visto que, a norma é exclusivamente para geomembranas com espessuras inferior a 1 mm. Utilizaram-se cinco corpos de prova na direção longitudinal com dimensão de 15x10cm, sendo que 2,5cm em cada extremidade foram fixados nas garras, tendo dessa maneira o comprimento de 10 cm a ser tracionado, a velocidade do ensaio foi de 500 mm/min.

O equipamento de tração fornece ao final do ensaio: valores de tensão de ruptura, da deformação, da força máxima e do módulo de elasticidade do material. Para tanto é necessário no início do ensaio, a entrada de dados tais como, a largura e a espessura das amostras.

3.3.6 Determinação da espessura

Para a determinação da espessura de geomembranas lisas, comumente utiliza-se a norma ASTM D5199-2012. Segundo esta norma, a definição de espessura é a distância entre uma superfície plana e sua superfície oposta paralela (plana). A espessura avaliada é a espessura nominal e não necessariamente a espessura mínima.

A espessura é uma das características físicas básicas usadas para o controle de qualidade de muitos geossintéticos e, ela pode ser requerida para o dimensionamento de outras propriedades dos geossintéticos, como o coeficiente de permeabilidade e valores de tração. A espessura nominal de geomembranas é determinada observando-se a distância perpendicular que um plano móvel é deslocado de uma superfície paralela no material enquanto ele está sob uma pressão específica, que para o caso das geomembranas, é de 20 kPa para um tempo de 5 segundos. A norma ainda especifica o diâmetro da amostra em 6,35mm. A figura a seguir mostra o equipamento para medir a espessura.

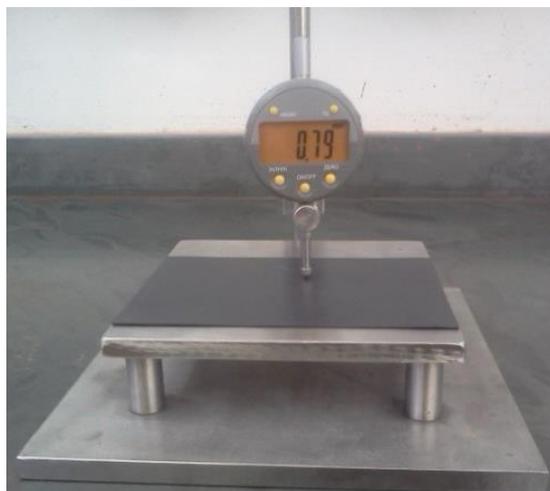


Figura 3-35 – Equipamento para medição de espessura de geomembrana lisa (GARDONI, 2013).

Para a determinação da espessura de geomembranas texturizadas comumente utiliza-se a norma ASTM 5994-2010. Esta norma preconiza o método para a medição da espessura do núcleo de geomembranas texturizadas. Segundo a norma, a espessura do núcleo de geomembranas medido pode variar consideravelmente, dependendo da pressão aplicada à amostra durante a medição. Para reduzir a variação nas medições e a chance de medir valores baixos devido a altas pressões, é especificada uma geometria de ponto medidor e a força aplicada de $0,56 \pm 0,05\text{N}$ refere-se ao medidor de espessura. O medidor deve ter um ponto de base e um ponto de prensa de movimento livre, cujos eixos estão alinhados uns com os outros. A figura a seguir apresenta o esquema do equipamento utilizado para a medição de espessura segundo a norma D5994.

Para a determinação das espessuras das amostras texturizadas de HDPE e lisas de PVC utilizou-se um equipamento desenvolvido por GARDONI 2013, conforme a Figura 3-35.

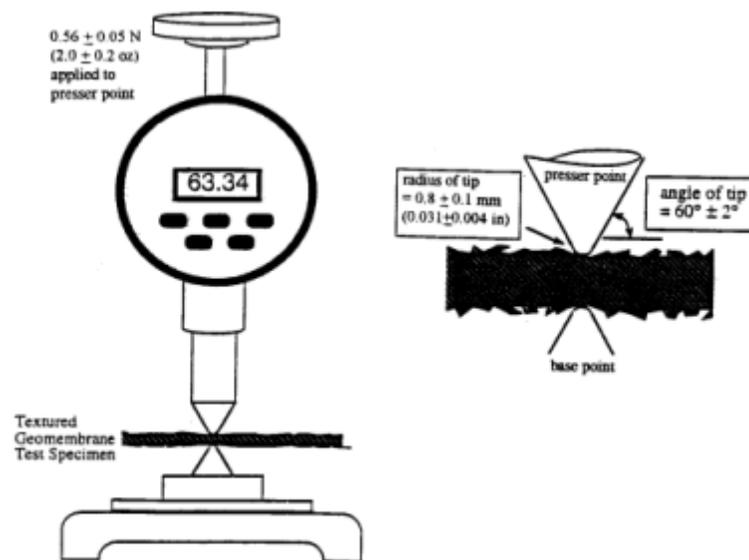


Figura 3-36 – Equipamento para medição da espessura de geomembrana texturizada nas duas faces, segundo a ASTM D5994



Figura 3-37 – Detalhe da medição da espessura do núcleo de geomembrana texturizada em uma face (GARDONI, 2013)

3.3.7 Determinação da densidade

Para a determinação da densidade das amostras utilizou-se a norma ASTM D792-2013 que têm como premissa o Princípio de Arquimedes no qual determina o volume dos corpos de prova para posterior determinação da densidade. Foram utilizados corpos de prova com dimensão 15x10cm. A Figura 3-38 apresenta o procedimento para a determinação da densidade das amostras.



Figura 3-38 – Balança para determinação da densidade

3.3.8 Análise Termogravimétrica (TGA)

Na Análise Termogravimétrica é possível avaliar a perda de massa dos materiais poliméricos em função do aumento da temperatura. O equipamento utilizado para a análise termogravimétrica é constituído basicamente por um forno, um programador de temperatura do forno, controle de atmosfera, balança registradora, cadinho ou porta amostra, sensor de temperatura. O equipamento possui um *software* que permite a aquisição direta dos dados, bem como o monitoramento e programação da análise. As Figura 3-39 a 3-41 apresentam o equipamento de análise termogravimétrica da marca SHIMADZU modelo TGA-50H que pertence ao Laboratório de Química da Universidade Federal de Minas Gerais.

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D6370. Inicialmente devem-se estabelecer as temperaturas inicial e final da análise, bem como a taxa de aquecimento. Neste caso foi estabelecido que a variação da temperatura fosse de 30 a 790°C aproximadamente, para esta faixa de temperatura adotou-se duas atmosferas, a saber: i) 30 a 550°C, atmosfera inerte em nitrogênio; ii) 550 a 790°C, atmosfera oxidante em oxigênio. A taxa de aquecimento para o HDPE e PVC foi de 20 e 10°C/min respectivamente.

Para as ambas as geomembranas de HDPE e PVC utilizaram-se amostras de 10 a 15mg. O prato da balança, onde é colocada a amostra é de Alumina, que resiste a altas temperaturas na qual é inerte as amostras. Para que não houvesse interferência no resultado devido ao acúmulo de material no prato da balança, aplicou-se um fluxo de ar (ambiente) de 50 ml/min. Com o objetivo de calibrar o equipamento, é realizado um ensaio sem o material; essa ação visa realizar a correção para as demais amostras.

Após essa calibração retira-se o cadinho do equipamento, e coloca-se a amostra. O conjunto (amostra e cadinho) é introduzido no equipamento, desde então se pode iniciar o ensaio. Após a realização do ciclo completo de temperatura e tempo pré-estabelecidos, retira-se o cadinho com o que restou da amostra e efetua-se a limpeza desse recipiente. As informações são armazenadas no software. A partir destas informações os resultados são apresentados em gráficos contendo no eixo das ordenadas a perda de massa em porcentagem *versus* a variação da temperatura no eixo das abscissas.



Figura 3-39 - Equipamento de termogravimetria e computador para aquisição dos dados



Figura 3-40 - Equipamento de termogravimetria



Figura 3-41-Detalhe do forno e cadinho

3.3.9 Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)

Para a análise microscópica utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JEOL JSM 6360LV do Centro de Microscopia da UFMG.

As amostras foram preparadas com recobrimento por deposição de íons metálicos de ouro (Au). A resolução das imagens variaram de 30 a 40.000 vezes para uma tensão de aceleração de 30kV. As Figura 3-42 e 3-45 mostram o microscópio utilizado nas análises e a Figura 3-4 as amostras preparadas par análise após a metalização com ouro.



Figura 3-42 – Vista geral do equipamento MEV

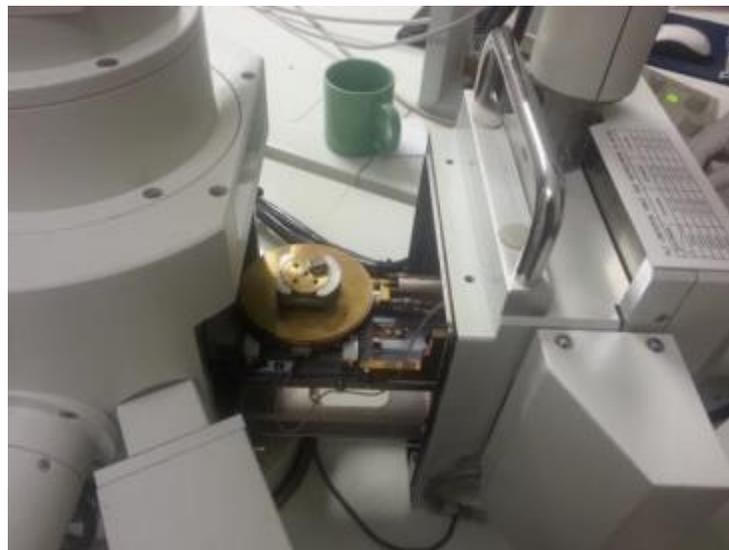


Figura 3-43 – Câmara da amostra com mesa para fixação dos suportes metálicos.



Figura 3-44 – Amostras metalizadas com ouro

3.3.10 Microscopia de Força Atômica (AFM)

Para a análise microscópica utilizou-se o Microscópio de Força Atômica modelo ASYLUM RESEARCH - MFP-3D-SA do Centro de Microscopia da UFMG. O AFM apresenta imagens com aparência tridimensional. Este tipo de análise é utilizado, porque ele possibilita visualizar a topografia da amostra e realizar medidas diretas de rugosidade. A varredura das imagens foi de 10 μ m vezes para uma tensão de aceleração de 30kV. As Figura 3-45 a 3.48 apresentam o microscópio utilizado nas análises.



a) vista equipamento

(b) vista interna

Figura 3-45 – Microscópio de Força Atômica – Modelo ASYLUM RESEARCH - MFP-3D-SA



Figura 3-46 – Computador para aquisição dos dados

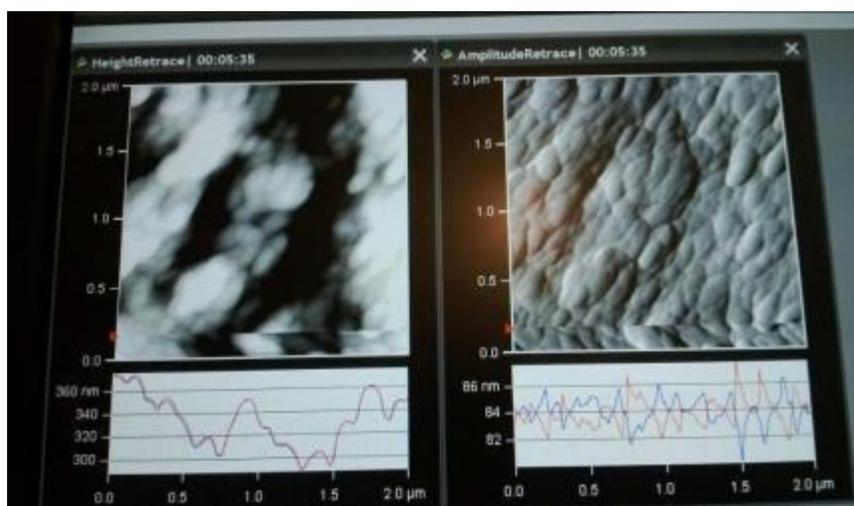


Figura 3-47 – Análise em andamento

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa e suas respectivas análises. Os resultados foram organizados em tabelas e em gráficos e referem-se às amostras de geomembrana de HDPE texturizada em uma face e PVC lisa com espessuras de 1,5m e 0,80mm, respectivamente. No item 4.2 são apresentados breves comentários sobre o comportamento observado dos materiais expostos em cada grupo de análise e, no item 4.3 apresenta-se uma discussão sucinta dos resultados encontrados.

4.2 Resultados das Propriedades Físicas

A seguir apresentam-se os resultados obtidos pelos diferentes procedimentos utilizados para o envelhecimento das amostras virgens e preparação das amostras envelhecidas em ensaios de durabilidade e na câmara de intemperismo e, aquelas exumadas em obras.

A Figura 4.1 apresenta a espessura das amostras de HDPE texturizada em uma face. Ressalta-se que a espessura indicada refere-se à alma da geomembrana (parte plana). Nota-se que de maneira geral as geomembranas exumadas (GMEX) possuem maior espessura quando comparada a virgem (GMV). Em média esse valor foi 3,5%, bem como se percebe a grande variação na espessura das mesmas. Pode se observar na Figura 4.2 que todas as geomembranas exumadas de PVC apresentaram espessura menor que as virgens, em média esse valor foi 11%.

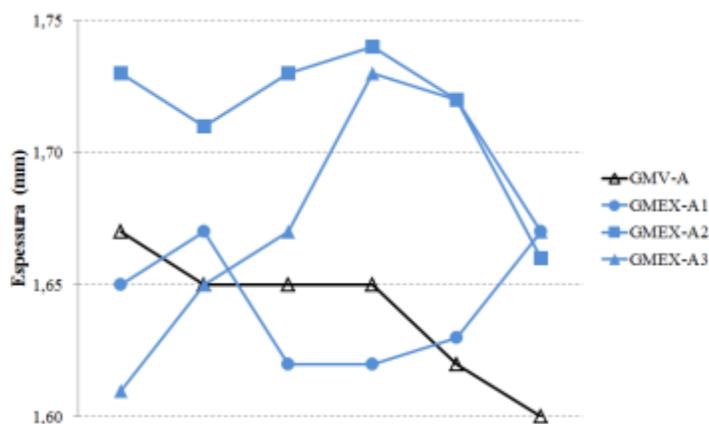


Figura 4.1 – Espessura GM de HDPE – Virgens e Exumadas

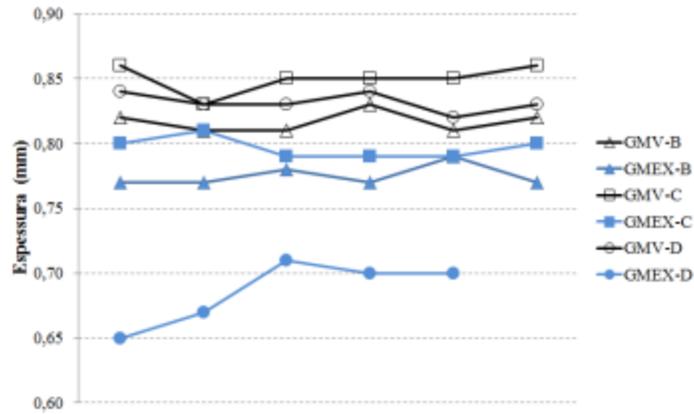


Figura 4.2 – Espessura GM de PVC - Virgens e Exumadas

A Figura 4.3 apresenta as espessuras da geomembrana de HDPE antes e depois do processo de envelhecimento simultâneo. Nota-se que as espessuras são similares, demonstrando que não houve alterações significativas na espessura. De maneira geral ocorreu um decréscimo na espessura das geomembranas de PVC após serem submetidas ao processo de envelhecimento por ensaios de durabilidade. A Figura 4.4 apresenta o resumo das espessuras antes e depois do processo.

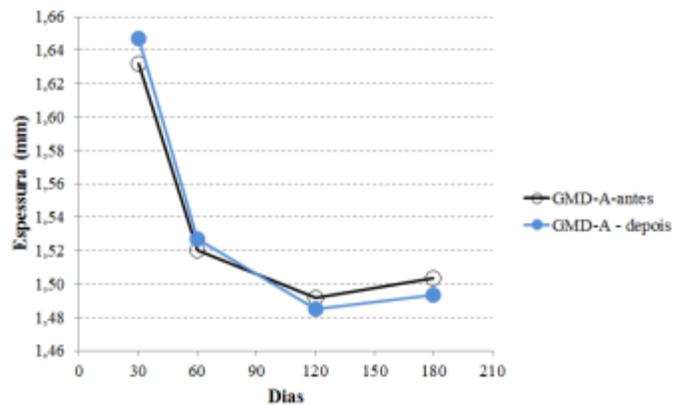


Figura 4.3 – Espessura GM de HDPE - antes e depois ensaio de durabilidade

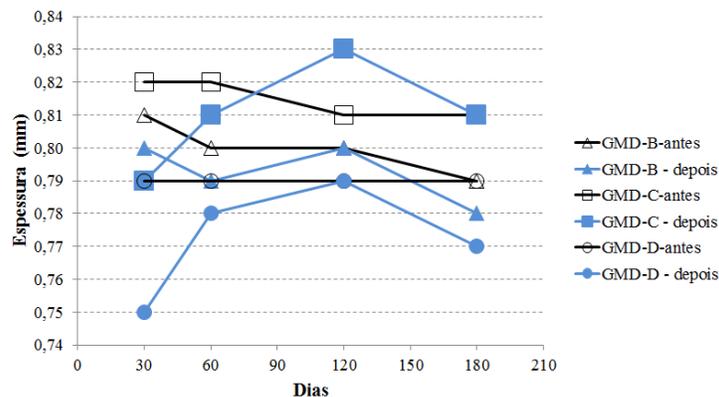


Figura 4.4 – Espessura GM de PVC - antes e depois do ensaio de durabilidade.

A Figura 4.5 apresenta as densidades para as geomembranas de HDPE virgens e exumadas e, percebe-se que as amostras virgens possuem uma densidade superior comparada às exumadas.

O mesmo comportamento foi observado para a amostra C virgem de PVC que apresentou densidade superior comparada à exumada, no entanto as amostras B e D virgens apresentaram densidades inferiores às exumadas, sendo a amostra D a que apresentou maior média (20%). A Figura 4.6 apresenta as densidades das mesmas.

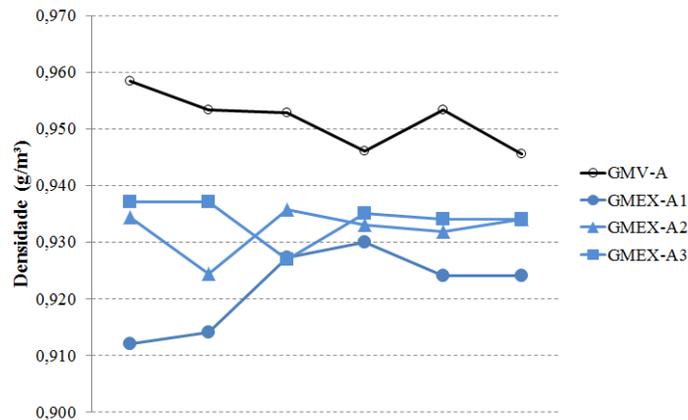


Figura 4.5 – Densidade GM de HDPE – Virgens e Exumadas

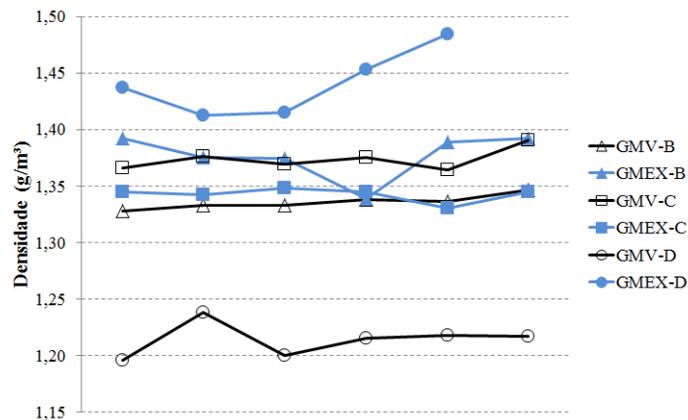


Figura 4.6 – Densidade GM de PVC – Virgens e Exumadas

A Figura 4.7 apresenta as densidades das amostras de HDPE antes e após o processo de envelhecimento em ensaio de durabilidade e, pode-se perceber que não houve alterações nas densidades ao longo do tempo, exceto para uma amostra correspondente ao tempo de 60 dias de envelhecimento que apresentou densidade superior comparada à mesma amostra antes do envelhecimento.

Observa-se na Figura 4.7 que amostras C e D de PVC apresentaram ligeiro acréscimo na densidade quando comparada com as mesmas amostras antes do envelhecimento, ao passo que a amostra B apresentou comportamento inverso.

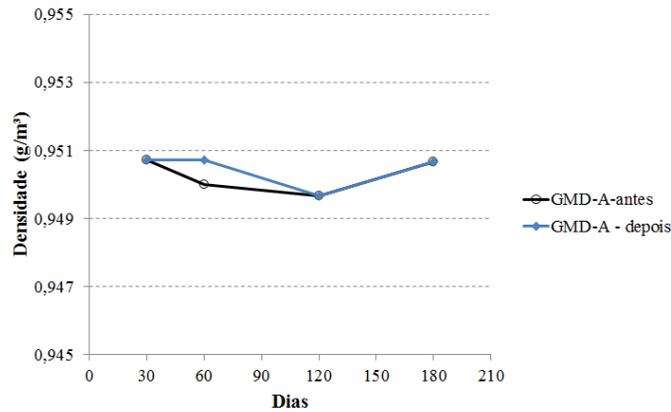


Figura 4.7 – Densidade GM de HDPE - antes do processo de envelhecimento em ensaio de durabilidade

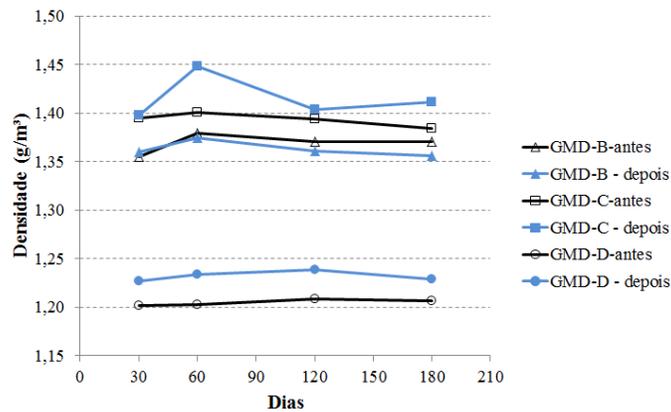


Figura 4.8 – Densidade GM de PVC - antes do processo de envelhecimento em ensaio de durabilidade

4.3 Resultados dos Ensaios de Resistência a Tração Simples

A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios de tração para os grupos de amostras exumadas, envelhecidas em ensaios de durabilidade e envelhecimento em Câmara Úmida. O resultado das amostras Virgens é apresentado em todos os grupos citados anteriormente, visto que através delas será possível realizar uma verificação de possíveis alterações nas propriedades. Todos os ensaios de Resistência à Tração Simples (RTS) foram realizados no sentido longitudinal de fabricação da geomembrana, que coincide com a direção de sua instalação.

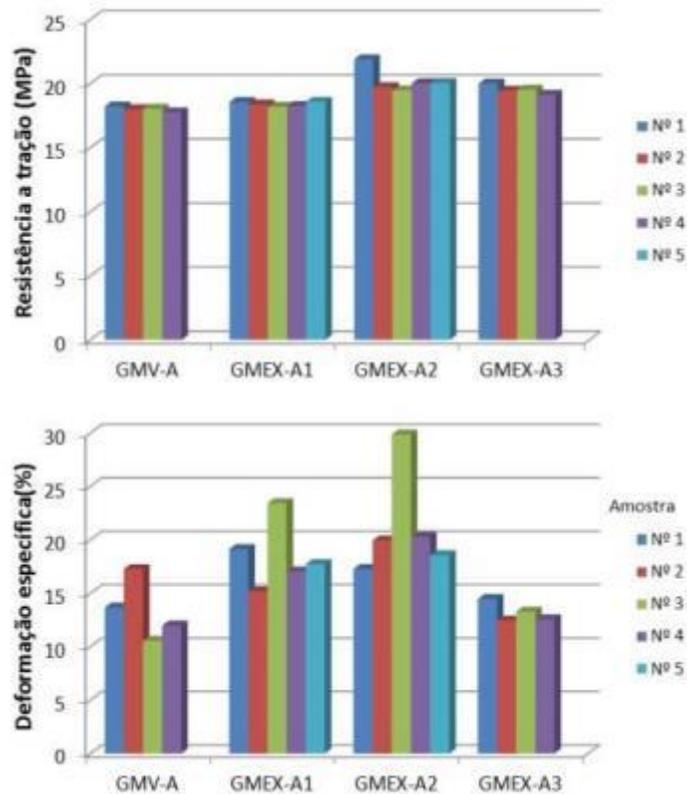
Para a realização dos ensaios utilizou-se duas prensas de tração: a primeira é uma prensa EMIC na qual foram ensaiadas as amostras envelhecidas em ensaios de durabilidade e as virgens

correspondentes e, a segunda é uma prensa INSTRON na qual foram ensaiadas as amostras envelhecidas na Câmara Úmida e as amostras virgens correspondentes. Portanto, variações nas propriedades das amostras virgens nesses dois grupos podem ser verificadas.

4.3.1 Amostras Exumadas

As amostras exumadas na obra foram retiradas nos espaldares dos taludes dos lagos e, a data de instalação foi em 2006, 2009, 2010 e 2011 conforme Tabela 3-7. A Figura 4.9 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas realizados nas amostras exumadas e virgens.

As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 18 MPa, tendo uma deformação específica com variação entre 11 e 17% e, com Módulo de Elasticidade variando entre 105 e 150 MPa. As amostras exumadas de HDPE apresentaram uma resistência média à tração que varia de 18 a 20MPa aproximadamente, com deformações correspondentes no escoamento, que variam entre 12 e 20% e Módulos de Elasticidade variando entre 65 a 150 MPa. Durante o ensaio de tração perdeu-se uma amostra virgem, portanto apresentou-se somente quatro amostras.



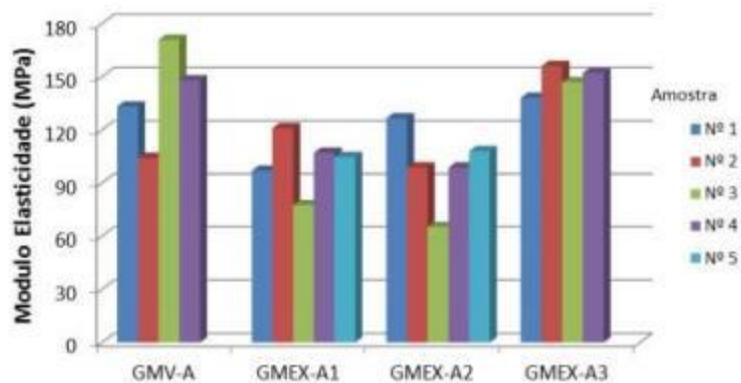
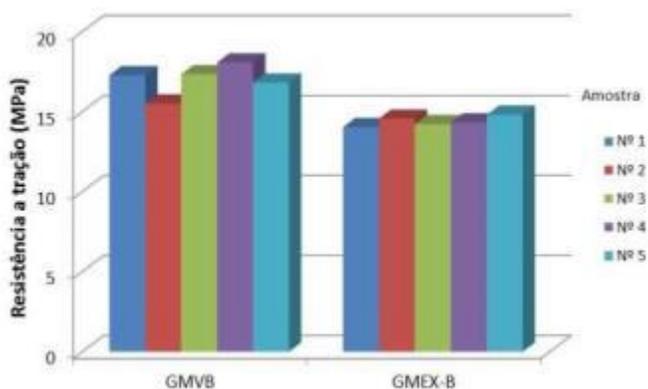


Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante A (HDPE)

A Figura 4.10 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas realizados nas amostras exumadas e virgens. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 17 MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 340% e Módulo de Elasticidade médio de 5MPa. As amostras exumadas de PVC do fabricante B apresentaram uma resistência média à tração de 14MPa aproximadamente, com deformabilidade na ruptura de 210% e Módulo de Elasticidade da ordem de 7MPa.

A geomembrana exumada que foi instalada na barragem em 2009, apresentou um decréscimo de 38% em sua deformação específica e um aumento na rigidez de aproximadamente 40%. Observou-se, na obra, que esta geomembrana encontrava-se exposta às intempéries. Verificou-se, ainda, que o deformação específica ficou bem abaixo do recomendado pelo fabricante (neste caso 370%).



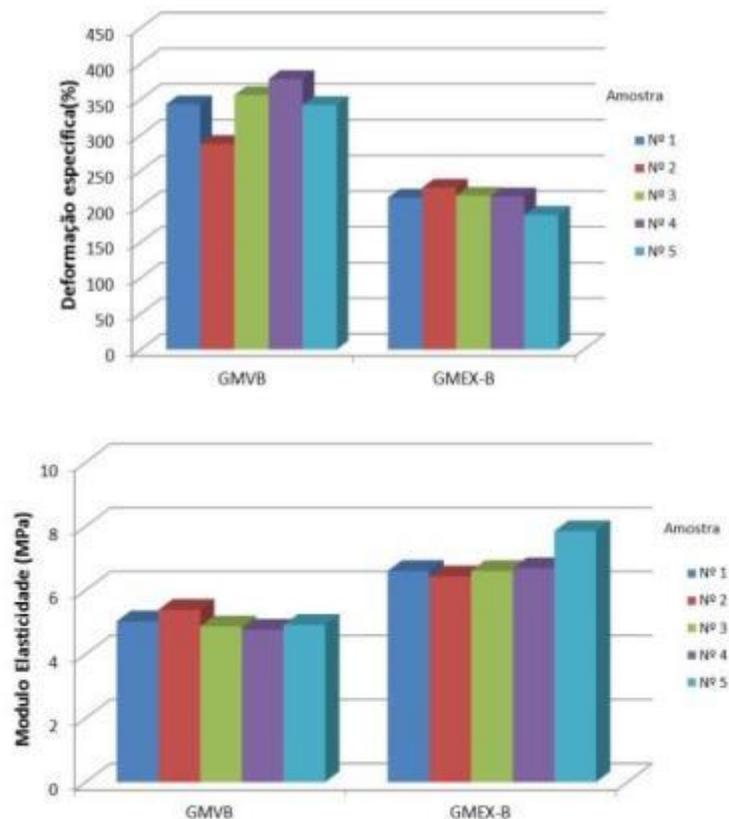


Figura 4.10 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante B (PVC)

A Figura 4.11 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas realizados nas amostras exumadas e virgens. As amostras virgens apresentaram uma resistência média a tração de 14,70MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 190% e Módulo de Elasticidade 7,70MPa. As amostras exumadas de PVC do fabricante C apresentaram uma resistência média à tração de 15,40 MPa aproximadamente, com deformabilidade na ruptura de 140% e Módulos Elasticidade da ordem de 11MPa.

Nota-se que ambas as amostras, virgem e exumada, apresentam similaridade nas propriedades mecânicas, logo se presume que este fato se deve a condição inadequada de armazenamento da GM virgem na obra. As amostras exumadas foram instaladas em 2011, ambas as geomembranas apresentaram alongamento na ruptura abaixo do recomendado pelo fabricante, neste caso 200%.

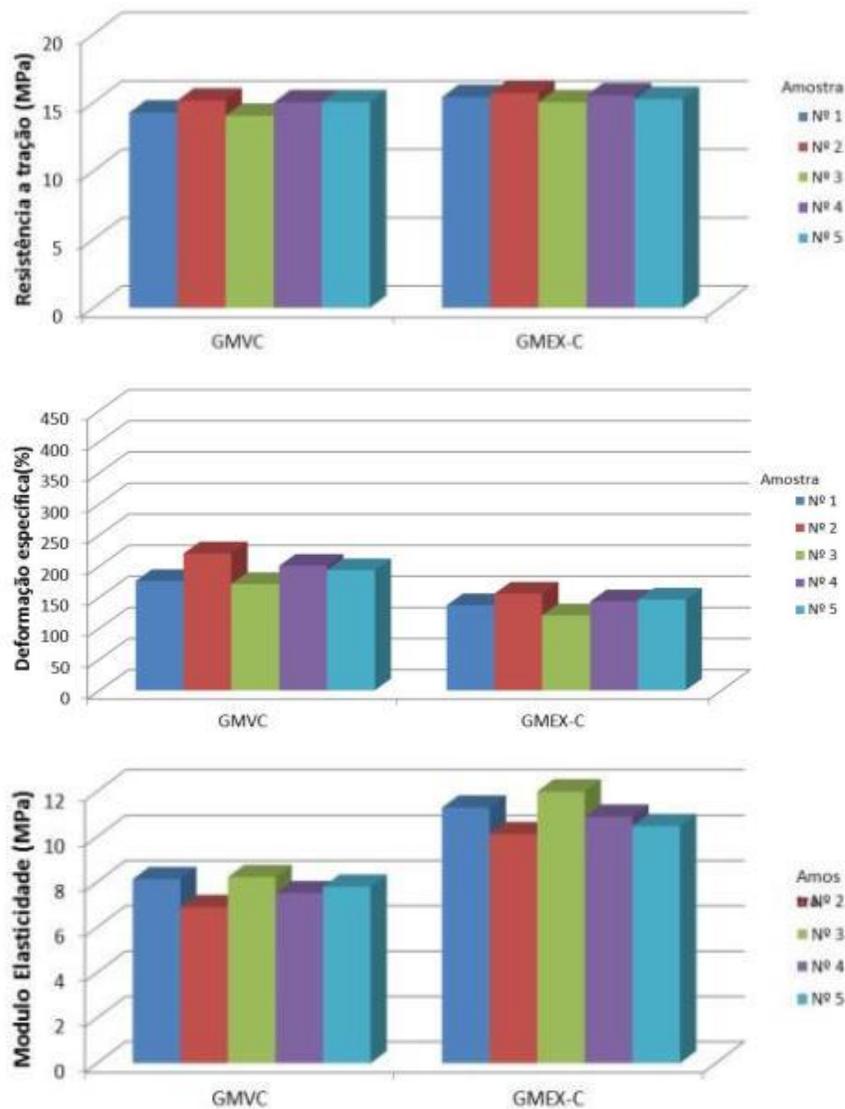


Figura 4.11 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante C (PVC)

A Figura 4.11 apresenta os resultados das propriedades mecânicas realizados nas amostras exumadas e virgens. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 15MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 350% e Módulo de Elasticidade igual a 4,40MPa. As amostras exumadas de PVC do fabricante D apresentaram uma resistência média à tração que variou entre 16 e 30MPa aproximadamente, com deformabilidade na ruptura variando de 7 a 68%, com Módulos Elasticidade variando da ordem 25 a 530MPa. Observou-se, que a amostra exumada apresentou um grau de degradação relevante, com elevada rigidez fato que a tornava bastante quebradiça. Esta amostra foi instalada em 2006, e se encontrava exposta às intempéries, mas não estava em contato direto com o rejeito e/ou fluido. Devido ao fato das amostras exumadas estarem

rígidas e quebradiças durante o ensaio de tração não foi possível gerar o gráfico de tensão versus deformação.

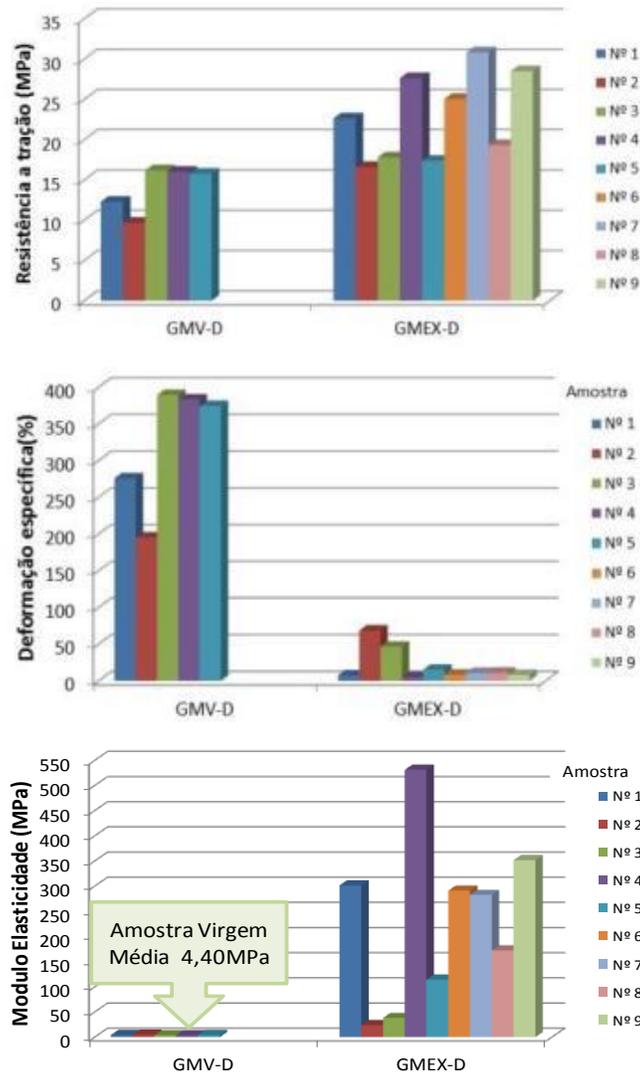


Figura 4.12 - Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas – Fabricante D (PVC)

4.3.2 Amostras Envelhecimento em Ensaio de Durabilidade

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas realizados em amostras virgens que foram envelhecidas simultaneamente por meio de radiação infravermelha com temperatura média de 37°C, radiação ultravioleta e imersão em fluido de cianeto. O período máximo de imersão foi de 180 dias e, durante este período ocorreram quatro retiradas, a saber: 30, 60, 120 e 180 dias. Adicionalmente, apresentam-se os resultados das amostras virgens, em cada gráfico e diagrama, que serão utilizadas como referência para avaliar-se a variação das propriedades.

A Figura 4-13 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 19 MPa, tendo uma deformação específica no escoamento de 16,50% e Módulo de Elasticidade 115MPa. Observa-se, que as propriedades de deformação específica e rigidez da amostra virgem estão próximas aos valores da amostra envelhecida em 180 dias.

Observa-se, para as amostras de HDPE envelhecidas, um acréscimo na resistência a tração comparando-se os vários períodos de retirada de amostras. Esses valores variaram de 18,70 a 19,20 MPa, da 1ª para a 4ª retirada. A deformação específica no escoamento variou entre 18,80 a 12,80% da 1ª para a 4ª retirada, houve um decréscimo significativo nessa propriedade da ordem de 47%. O Módulo de Elasticidade apresentou uma variação de 100 a 150 Mpa da 1ª para a 4ª retirada, conferindo um aumento na rigidez de 50%.

A Figura 4.14 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens de geomembrana do fabricante B. As amostras virgens apresentaram uma resistência média a tração de 17 MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 340% e Módulo de Elasticidade médio de 5MPa. Observa-se nas amostras de PVC do fabricante B um acréscimo na resistência a tração comparando-se os vários períodos de retirada de amostra, esses valores variaram de 16,80 a 18 MPa, da 1ª para a 4ª retirada. A deformação específica na ruptura variou entre 370 a 325% da 1ª para a 4ª retirada, percebe-se um decréscimo nessa propriedade da ordem de 13%. O Módulo de Elasticidade apresentou uma variação de 4,50 a 5,50 MPa da 1ª para a 4ª retirada, conferindo um aumento na rigidez de 18%.

Nota-se que não houve alterações significativas nas propriedades das amostras do fabricante B, e que as propriedades verificadas são similares às amostras envelhecidas em 180 dias.

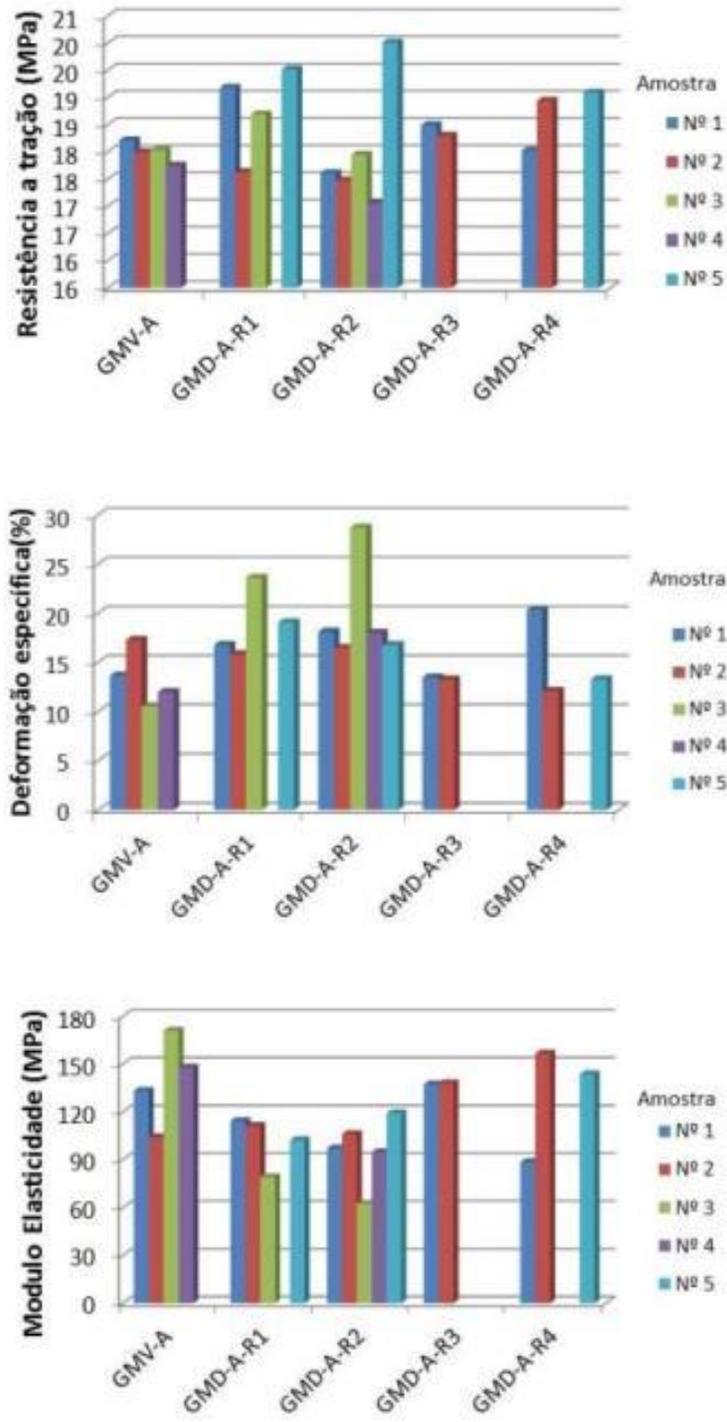


Figura 4-13 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante A (HDPE)

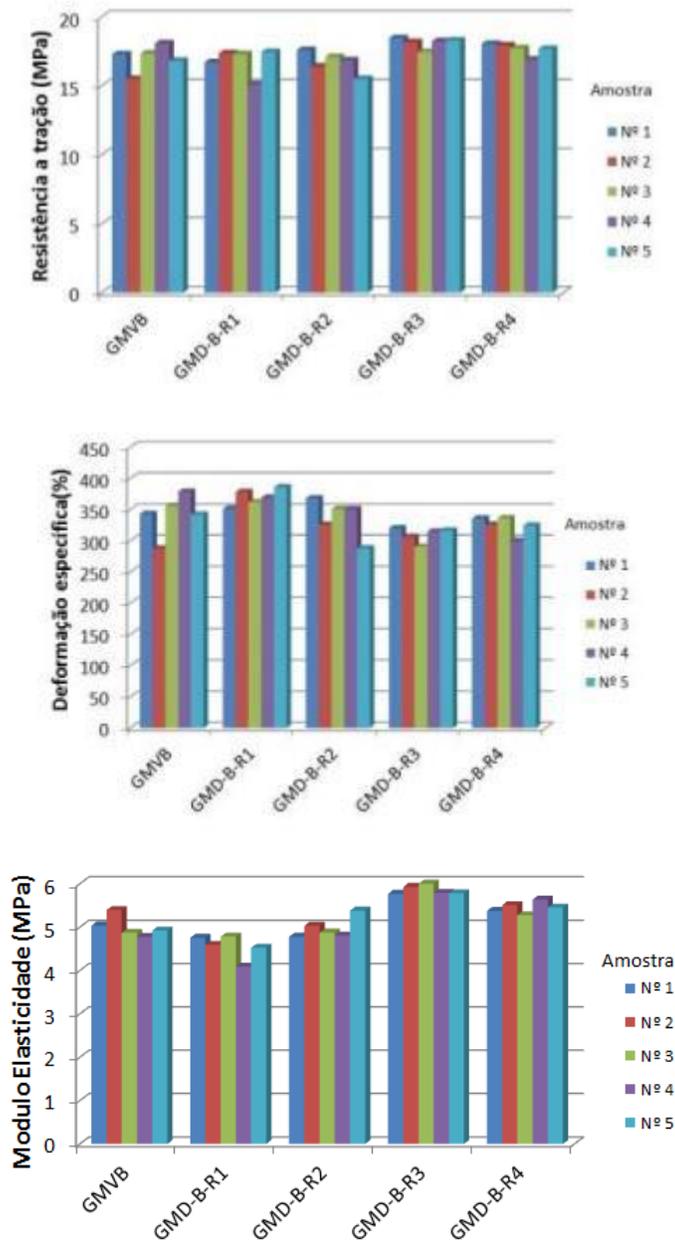


Figura 4.14 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante B (PVC)

A Figura 4-15 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens de geomembrana do fabricante C.

Para as amostras de PVC do fabricante C observou-se na 1ª e 2ª retirada uma resistência à tração média de 14 a 15MPa, enquanto para a 3ª e 4ª retirada uma resistência média de 17MPa. A deformação específica na ruptura na 1ª e 2ª retirada variou entre 350 e 380% respectivamente, enquanto para a 3ª e 4ª retirada observou-se valores médios de 170 e 155% respectivamente. O Módulo de

Elasticidade médio na 1ª e 2ª retirada foi de 4MPa, ao passo que na 3ª e 4ª retirada esses valores variaram entre 10 e 11MPa, respectivamente. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 14,70MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 190% e Módulo de Elasticidade igual a 7,70MPa.

Observa-se que nos dois primeiros meses do envelhecimento que correspondem a 1ª e 2ª retirada houve um acréscimo na deformabilidade e decréscimo na rigidez comparado às amostras virgens. Nos meses subsequentes, correspondentes a 3ª e 4ª retirada, ocorreu um decréscimo na deformabilidade e um acréscimo substancial na rigidez.

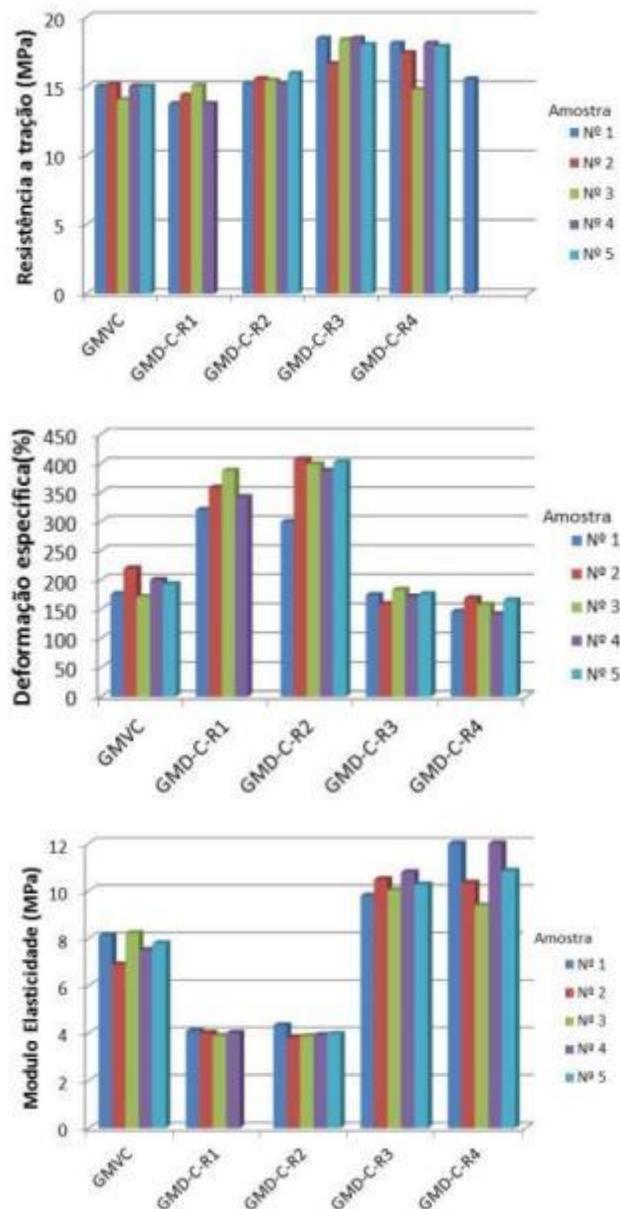


Figura 4-15 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante C (PVC)

A Figura 4-16 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens. As amostras virgens apresentaram uma resistência média a tração de 15 MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 350% e Módulo de Elasticidade 4,40MPa. Para as amostras de PVC do fabricante D verificou-se uma resistência a tração média 15,30MPa. A deformação específica na ruptura variou entre 370 e 285% da 1ª para a 4ª retirada, percebe-se um decréscimo nessa propriedade na faixa de 30%. O Módulo de Elasticidade apresentou uma variação de 4 a 5,40 MPa da 1ª para a 4ª retirada, conferindo um aumento na rigidez de 25%. Nota-se que na 3ª e 4ª retirada ocorreu uma diminuição na deformabilidade e aumento da rigidez mais pronunciado.

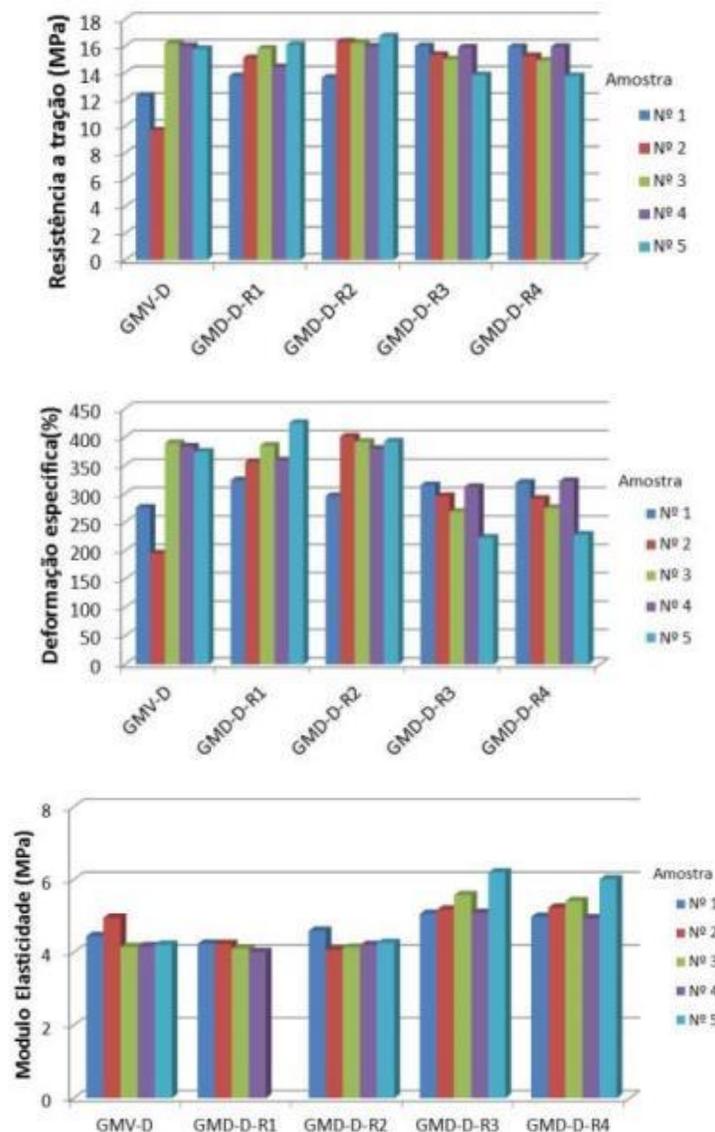


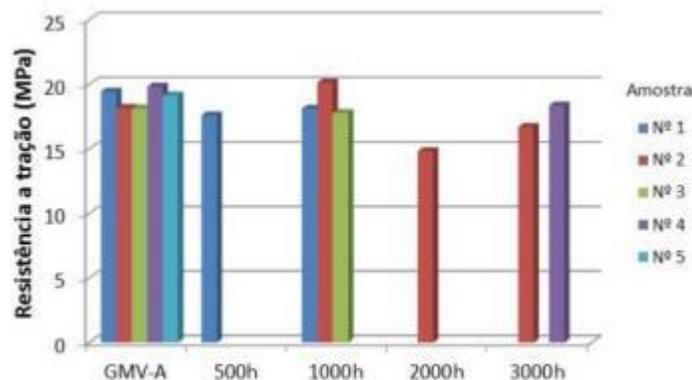
Figura 4-16 - Resultados dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante D (PVC)

4.3.3 Amostras Envelhecidas em Câmara Úmida

A seguir apresentam-se os resultados obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas realizados em amostras virgens que foram envelhecidas em câmara úmida com uma atmosfera saturada de umidade compreendida entre 95 a 100% com condensação contínua e temperatura de 40°C. O período máximo de exposição foi de 3000h que corresponde a 125dias. Neste período ocorreram quatro retiradas, nos tempos, a saber: 500, 1000, 2000 e 3000 horas. Adicionalmente apresentam-se em cada gráfico e diagrama os resultados das amostras virgens que serão utilizadas como referência para avaliar-se possíveis alterações nas propriedades físicas.

A Figura 4.17 mostra os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens. Para as amostras de HDPE observou-se um valor de resistência a tração da ordem de 18 MPa da 1ª para a 4ª retirada. A deformação específica no escoamento variou entre 15,65 a 19%. O Módulo de Elasticidade apresentou uma variação de 98 a 125 MPa. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 18 MPa, tendo uma deformação específica no escoamento de 13% e Módulo de Elasticidade igual a 139MPa.

Nota-se que não ocorreu uma variação acentuada nas propriedades das amostras virgens compara com as envelhecidas. Durante o ensaio várias amostras foram perdidas por motivos variados desde rompimento prematuro na garra e escorregamento da amostra.



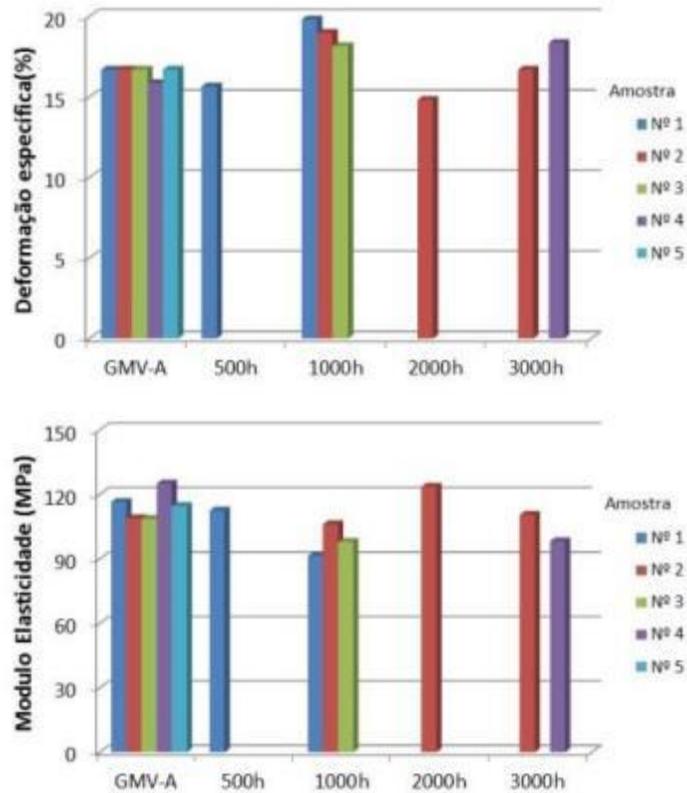


Figura 4.17 – Resultados ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante A (HDPE)

A Figura 4.18 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens. Observa-se nas amostras de PVC do fabricante B uma resistência à tração média de 18 MPa. A deformação específica na ruptura na ordem de 360% para as amostras da 1^a a 3^a retirada e 400% para as amostras da 4^a retirada. O Módulo de Elasticidade apresentou um valor de 4,90Mpa da 1^a para a 3^a retirada, e 4,60MPa para a 4^a retirada. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 19 MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 390% e Módulo de Elasticidade médio de 4,90MPa.

Nota-se que não houve alterações significativas nas propriedades das amostras do fabricante B para as amostras virgens e envelhecidas.

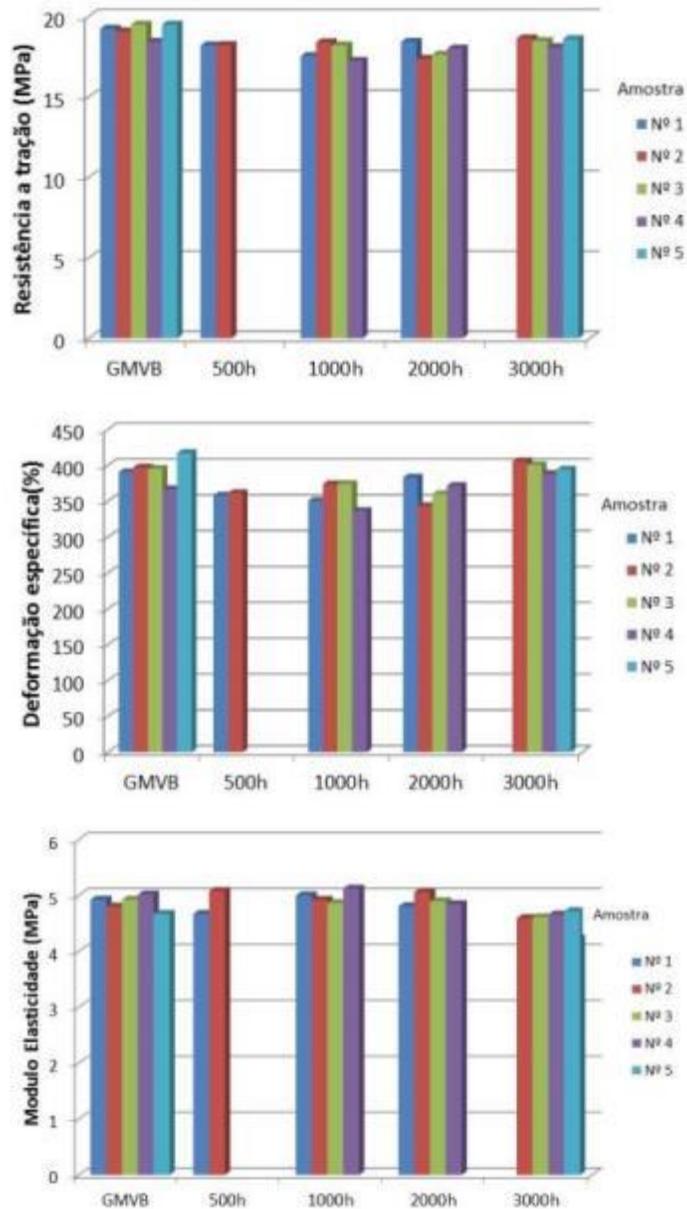


Figura 4.18 – Resultados ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante B (PVC)

A Figura 4.19 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens. As amostras virgens apresentaram uma resistência média a tração de 16,70MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 190% e Módulo de Elasticidade 7,20MPa. Observa-se que não houve alterações acentuadas nas propriedades das amostras envelhecidas e virgens.

Para as amostras de PVC do fabricante C observou-se uma resistência à tração média de 17 MPa, para uma deformabilidade média verificada da ordem de 240%. Exceção para as amostras da 3ª retirada que apresentaram resistência à tração e deformabilidade de 15MPa e 188% , respectivamente. O Módulo de Elasticidade médio foi de 7,30MPa, ao passo que na 3ª retirada esse valor foi igual a 8,20MPa.

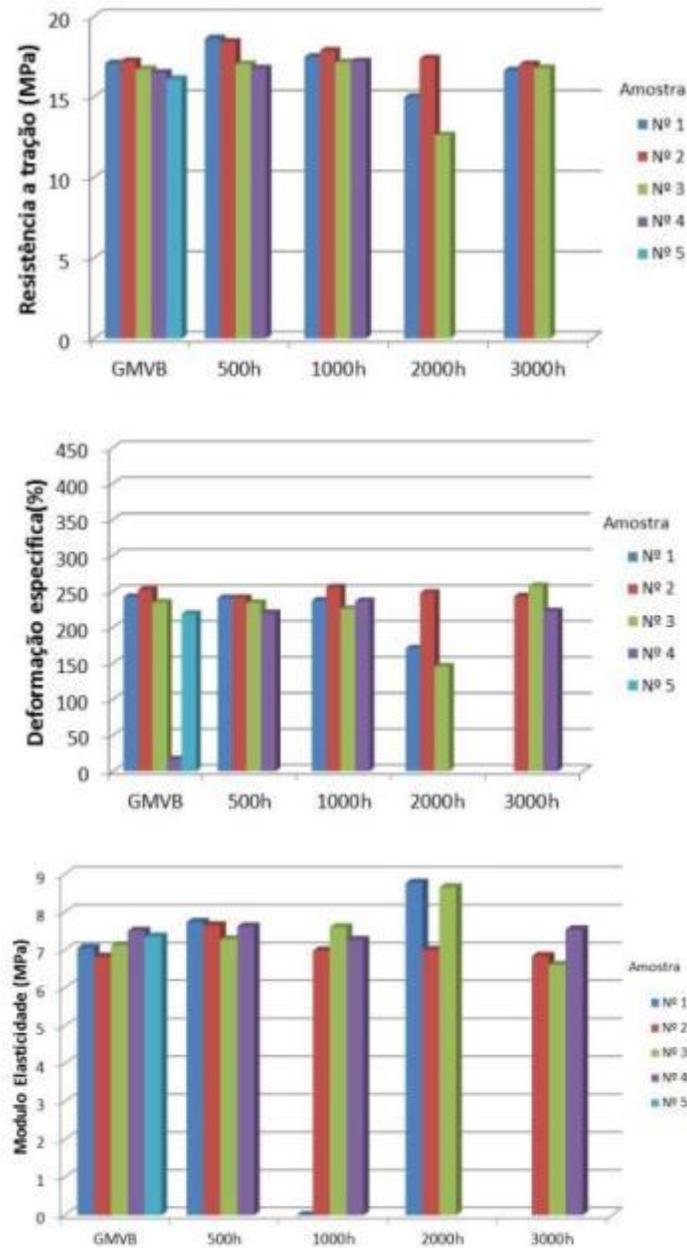


Figura 4.19 – Resultados ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante C (PVC)

A Figura 4.20 apresenta os diagramas obtidos para os ensaios de propriedades mecânicas em amostras envelhecidas e virgens. Para as amostras de PVC do fabricante D verificou-se uma resistência à tração média igual a 16MPa. A deformação específica média na ruptura foi de 410%, e o Módulo de Elasticidade apresentou um valor de 4,10 Mpa. As amostras virgens apresentaram uma resistência média à tração de 17MPa, tendo uma deformação específica na ruptura média de 425% e Módulo de Elasticidade igual a 4MPa. Nota-se que as propriedades das amostras envelhecidas e virgens são similares.

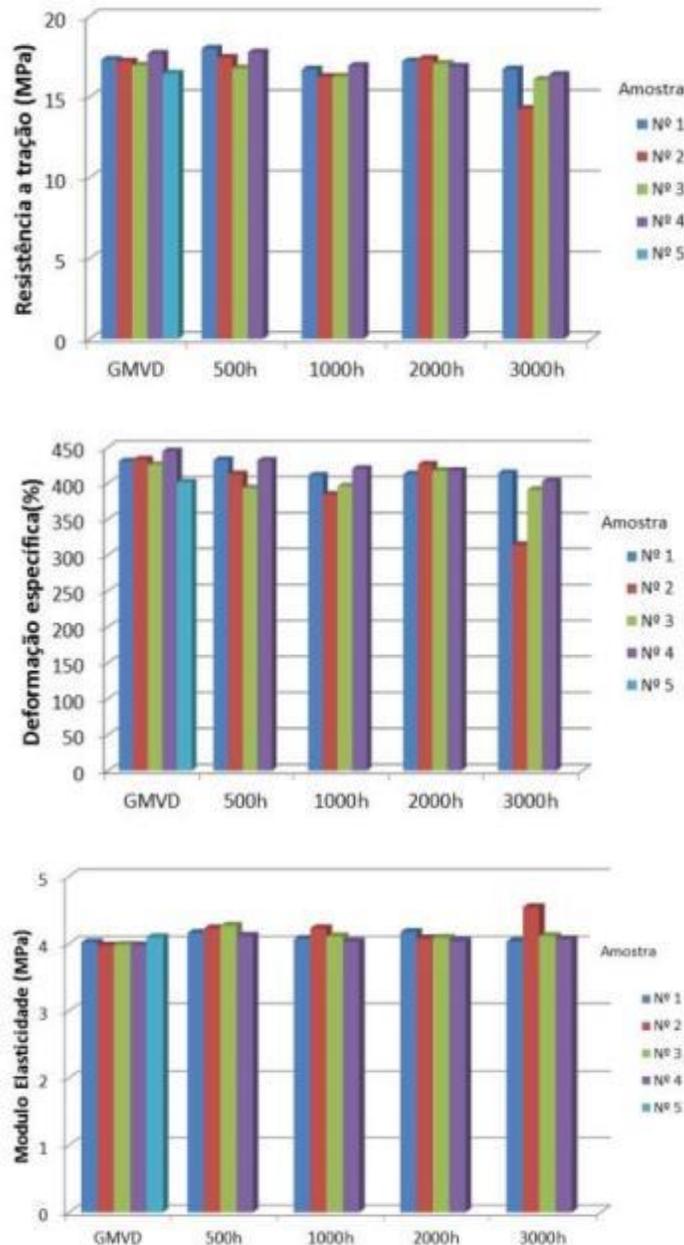
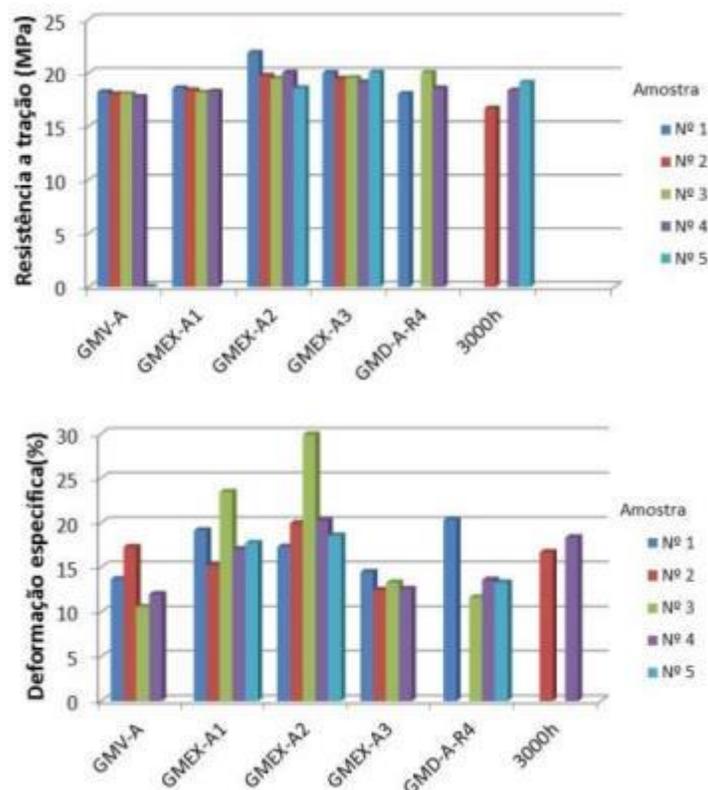


Figura 4.20 – Resultados dos ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante D (PVC)

4.3.4 Comparação entre os resultados obtidos para as amostras Exumadas, Envelhecidas em Câmara Úmida e Envelhecimento em ensaios de durabilidade.

A seguir será apresentada uma comparação dos resultados obtidos para os diversos grupos, a saber: Virgens (GMV) Exumadas (GMEX), Envelhecimento em Câmara Úmida (GME) e Envelhecimento em ensaios de durabilidade (GMD). Para os grupos GMD e GME os resultados são referentes a 180 dias e 3000h (125 dias), de envelhecimento.

As Figura 4.21 apresenta um comparativo dos diagramas obtidos no ensaio de resistência a tração simples para as amostras de HDPE. As amostras A2 e A3 do grupo GMEX e as amostras do GMD apresentaram uma deformabilidade inferior comparada a virgem, no entanto as amostras de 3000h do grupo GME e a amostra A1 do grupo GMEX apresentaram uma deformabilidade superior comparada a virgem. Nota-se que as amostras do grupo GMV, GMD e a amostra A3 do GMEX tiveram um aumento no Módulo de Elasticidade conferindo uma maior rigidez às amostras.



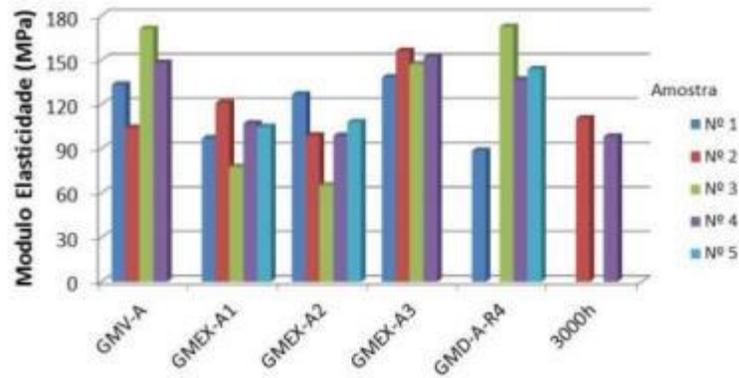
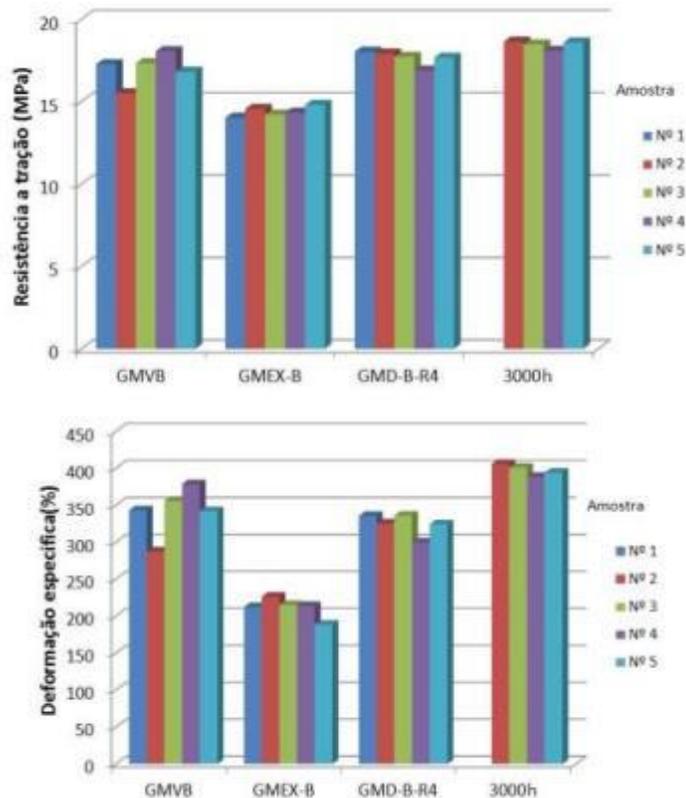


Figura 4.21 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante A (HDPE)

A Figura 4.22 apresenta um comparativo dos diagramas obtidos no ensaio de resistência à tração simples para as amostras de PVC do fabricante B. Percebe-se que as amostras de 3000h do grupo GME apresentaram uma deformação específica superior e uma rigidez inferior às demais amostras, inclusive a virgem. As amostras do grupo GMD apresentaram deformabilidade ligeiramente inferior e rigidez superior, ao passo que as amostras do grupo GMEX, apresentaram alta rigidez e um decréscimo acentuado na deformação.



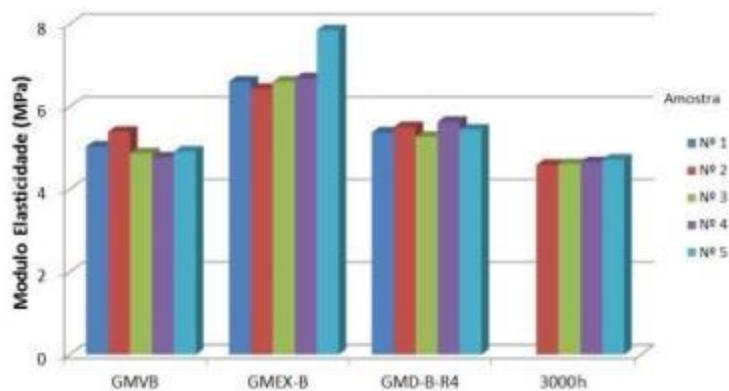
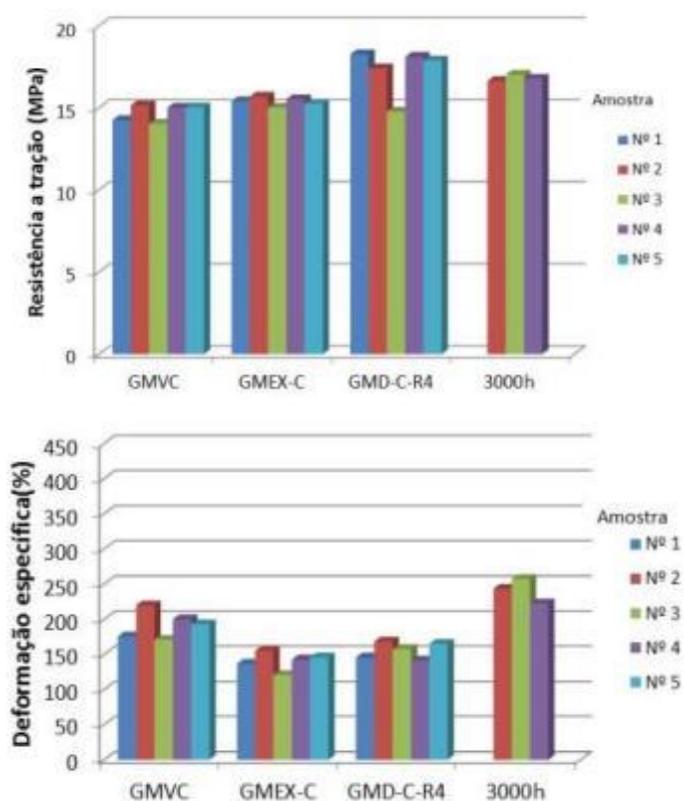


Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante B (PVC)

A Figura 4.23 apresenta um comparativo dos diagramas obtidos no ensaio de resistência à tração simples para as amostras de PVC do fabricante C. Percebe-se que as amostras de 3000h do grupo GME apresentaram uma deformação específica superior e uma rigidez inferior as demais amostras inclusive a virgem. As amostras do grupo GMD e GMEX apresentaram alta rigidez e um decréscimo acentuado na deformação.



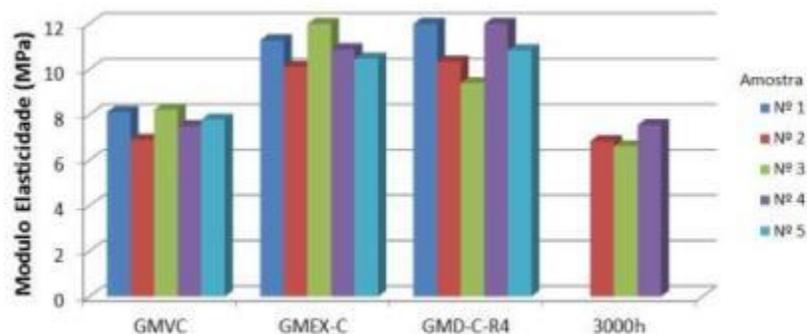
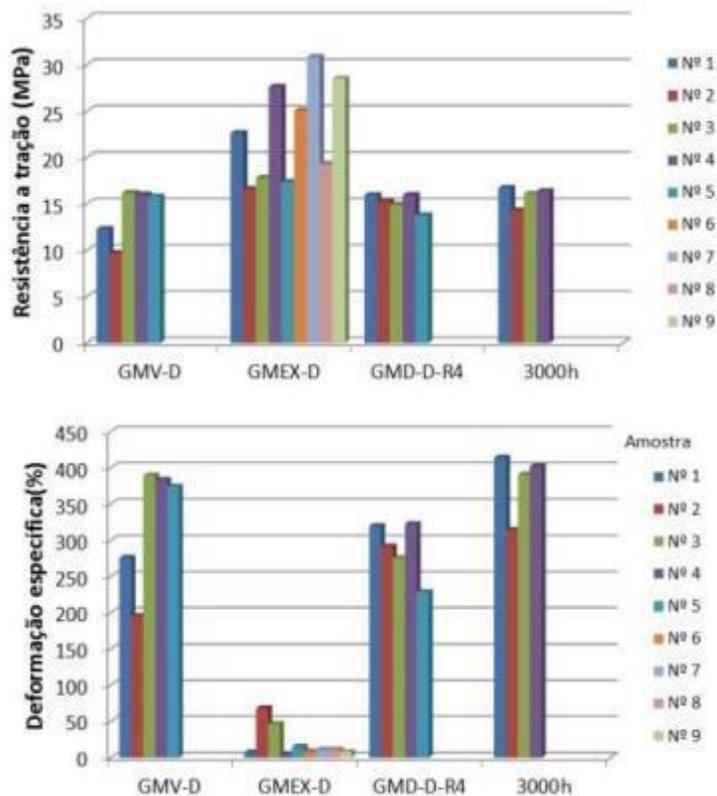


Figura 4.23 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante C (PVC)

A Figura 4.24 apresenta um comparativo dos diagramas obtidos no ensaio de resistência a tração simples para as amostras de PVC do fabricante D. Observa-se que as amostras de 3000h do grupo GME apresentaram uma deformação específica e uma rigidez similar a virgem, no entanto as amostras do grupo GMD apresentaram ligeiro acréscimo na rigidez e ligeiro decréscimo na deformação. As amostras GMEX apresentaram uma deformabilidade excessivamente baixa, e uma rigidez muito alta. Devido à alta rigidez da membrana durante o ensaio não foi possível à geração da curva, portanto a informação disponível esta em termos de força máxima e deformação.



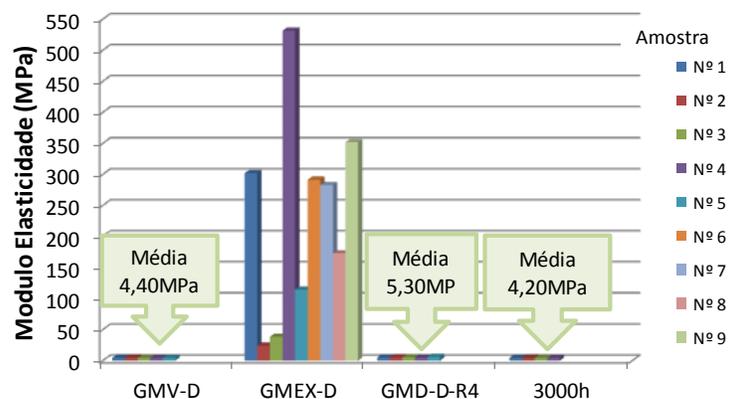


Figura 4.24 – Resultados dos ensaios de tração – Fabricante D (PVC)

4.3.5 Resultados da Análise Termogravimétrica

Os resultados de perda de massa obtidos na Análise Termogravimétrica são apresentados na

Tabela 4-1 e a massa residual na Figura 4-25.

Tabela 4-1 – Resultados ensaio TGA (HDPE) – Perdas de massa

Condição	Amostra	Parâmetro	
		A %	B %
Virgem	GMV-A	99,48	0,52
Exumada	GMEX-A1	100,00	0,00
	GMEX-A2	100,00	0,00
	GMEX-A3	100,00	0,00
Envelhecimento Simultâneo	GMD-A-R4	100,00	0,00
Envelhecimento Câmara Úmida	GME-A-3000h	98,55	1,45

Notas: A – Polietileno / B – Negro de Fumo + teor de cinzas

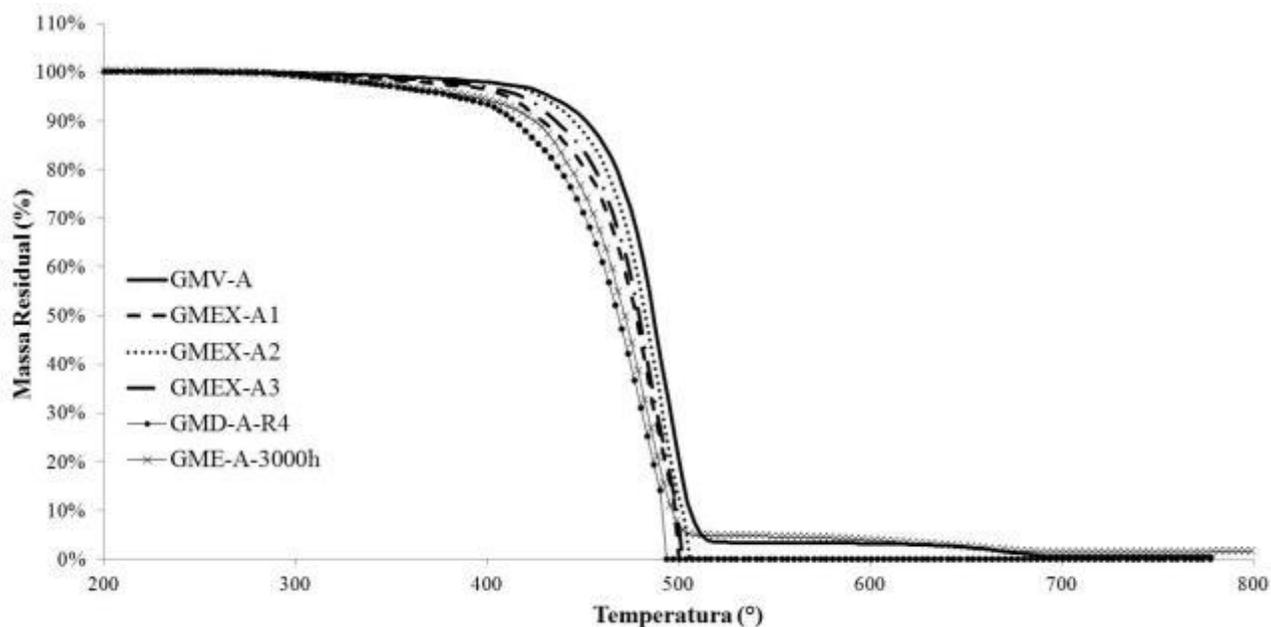


Figura 4-25 – Resultado TGA para amostras de HDPE – Fabricante A

A Tabela 4-2 apresenta os valores de perda de massa para a geomembrana de PVC amostra B e, a Figura 4-26 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 4-2 – Resultados ensaio TGA (PVC) – Perdas de massa e composição – Amostra B

Condição	Amostra	Parâmetro			
		A %	B %	C %	D %
Virgem	GMV-B	58,80	11,04	17,30	12,41
Exumada	GMEX-B	53,02	10,64	19,01	16,82
Envelhecimento Simultâneo	GMD-B-R4	59,10	12,11	16,04	12,07
Envelhecimento Câmara Úmida	GME-B-3000h	57,11	11,21	17,23	12,96

Notas: A – Plastificantes + HCL / B – Polímero Residual / C – Polímero Carbonáceo + Negro de fumo / D - Teor cinzas

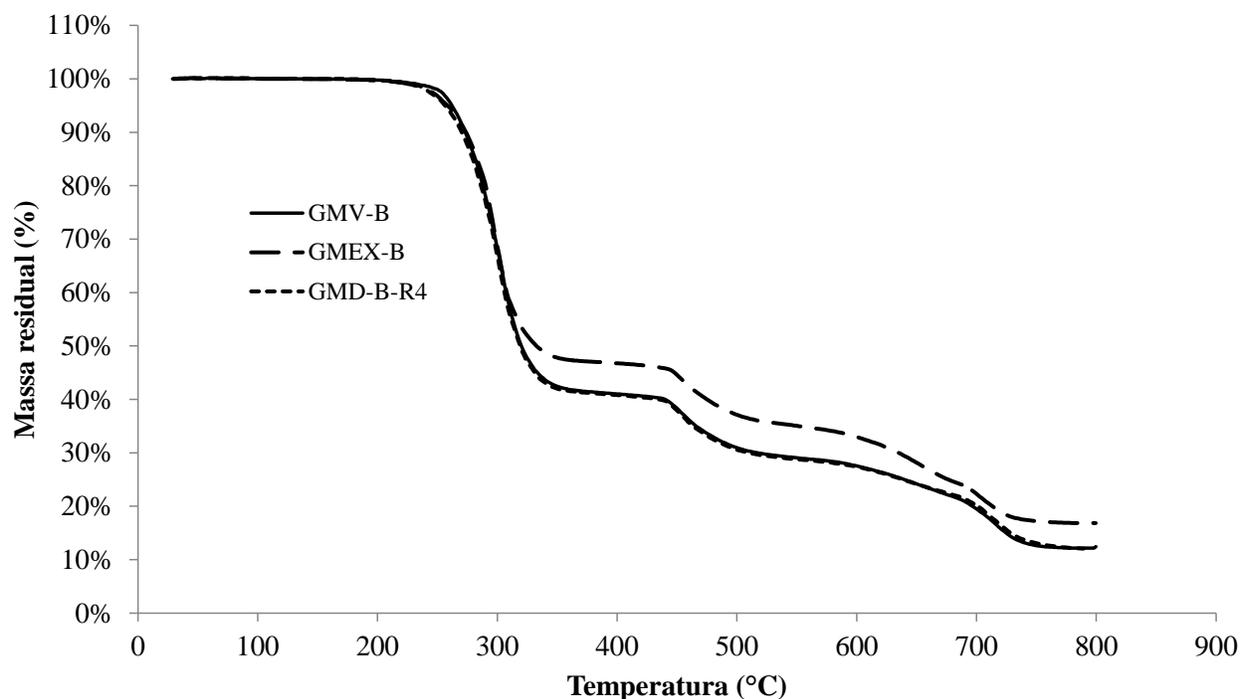


Figura 4-26 – Resultado TGA para amostras de PVC – Fabricante B

A Tabela 4-3 apresenta os valores de perda de massa para a geomembrana de PVC amostra B e, a Figura 4-27 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 4-3 – Resultados ensaio TGA (PVC) – Perdas de massa e composição – Amostra C

Condição	Amostra	Parâmetro			
		A %	B %	C %	D %
Virgem	GMV-C	52,75	13,75	20,80	12,55
Exumada	GMEX-C	55,62	14,13	18,03	11,35
Envelhecimento Simultâneo	GMD-C-R4	51,02	13,94	12,56	14,10
Envelhecimento Câmara Úmida	GME-C-3000h	52,71	13,63	20,42	12,69

Notas: A – Plastificante + HCL / B – Polímero Residual / C – Polímero Carbonáceo + Negro de fumo / D - Teor de cinzas.

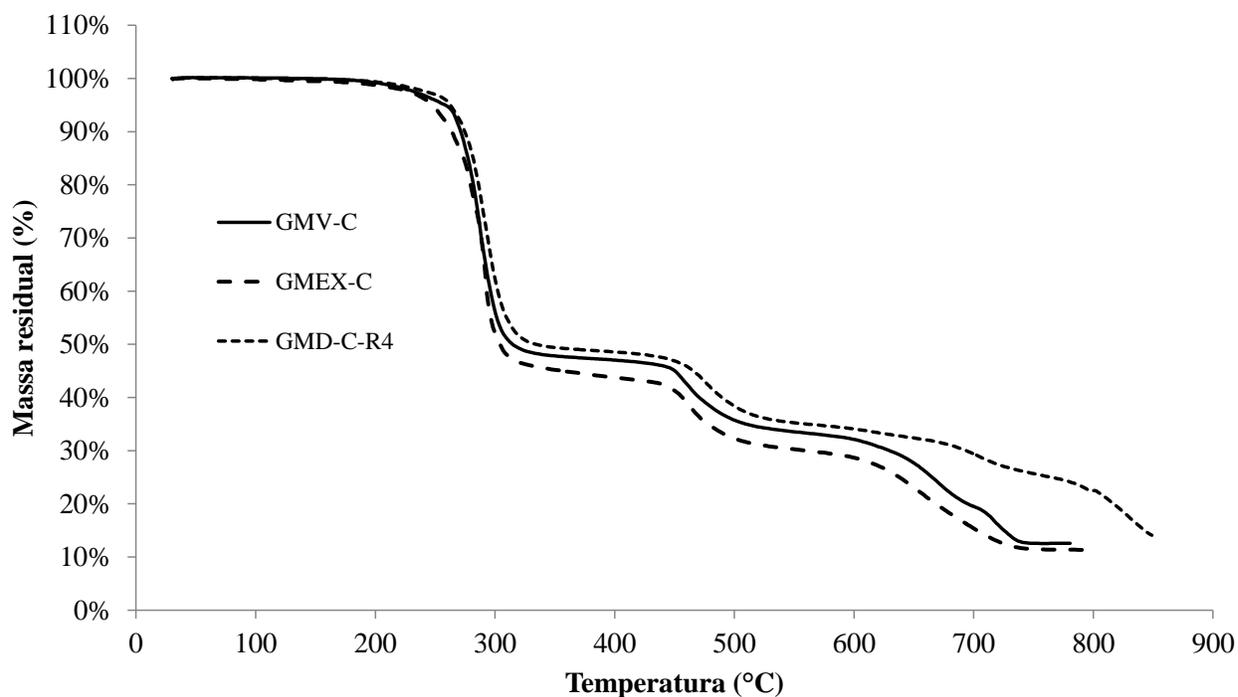


Figura 4-27 – Resultado TGA para amostras de PVC – Fabricante C

A Tabela 4-4 apresenta os valores de perda de massa para a geomembrana de PVC amostra D e, a Figura 4-28 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 4-4 – Resultados ensaio TGA (PVC) – Perdas de massa e composição – Amostra D

Condição	Amostra	Parâmetro			
		A %	B %	C %	D %
Virgem	GMV-A	58,81	12,14	15,04	12,61
Exumada	GMEX -D	50,51	13,14	22,13	13,97
Envelhecimento Simultâneo	GMD-D-R4	69,88	14,81	12,78	1,67
Envelhecimento Câmara Úmida	GME-D-3000h	69,30	14,98	13,41	1,05

Notas: A – Plastificantes + HCL / B – Polímero Residual / C – Polímero Carbonáceo + Negro de fumo / D - Teor de cinzas

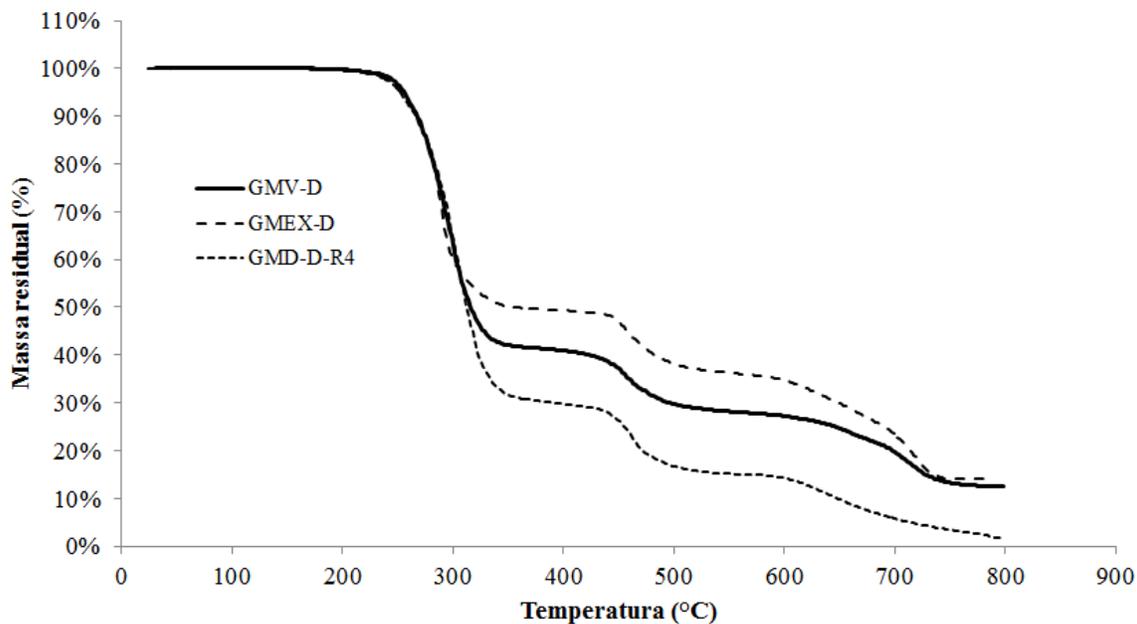


Figura 4-28 – Resultado TGA para amostras de PVC – Fabricante D

4.3.6 Análise Microscopia Eletrônica por Varredura

As

Figura 4.29 à 4.36 apresentam as imagens das geomembranas de HDPE do fabricante A para os grupos de amostras, a saber: Virgem (GMV), Exumada (GMEX), Envelhecimento em Ensaio de Durabilidade (GMD) e Envelhecimento em Câmara Úmida (GME). As imagens foram obtidas no MEV e, as resoluções variaram de 30 a 40.000 vezes do tamanho real (área aproximada 1,0 cm²) das amostras. Todas as análises foram realizadas no lado liso das geomembranas, que coincide com o lado que a mesma está exposta as intempéries (radiações infravermelha e ultravioleta e fluido cianetado).

Pode-se observar que as amostras de geomembranas virgens (GMV) apresentam uma textura não homogênea. No grupo GMEX, a amostra A1 mostra sinais de degradação, bem como a amostra A3 que apresenta acentuado grau de degradação sobre sua superfície, ao passo que a amostra A2 apresenta algumas estrias que se presume ser o início de algum processo de degradação. As amostras do grupo GMD, R1 e R4 que correspondem a 30 e 180 dias respectivamente, apresentaram certo grau de degradação, enquanto as amostras do grupo GME apresentam estrutura com danos mais suavizados.

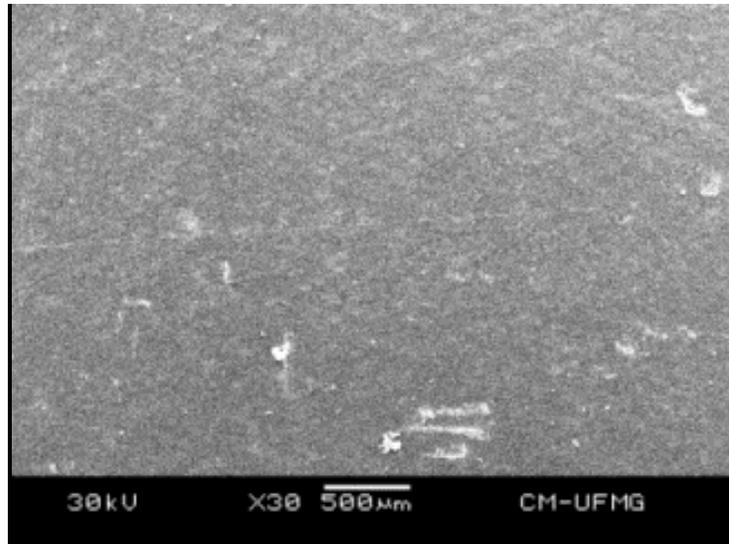


Figura 4.29 – Superfície GMV-A (aumento de 30 vezes)

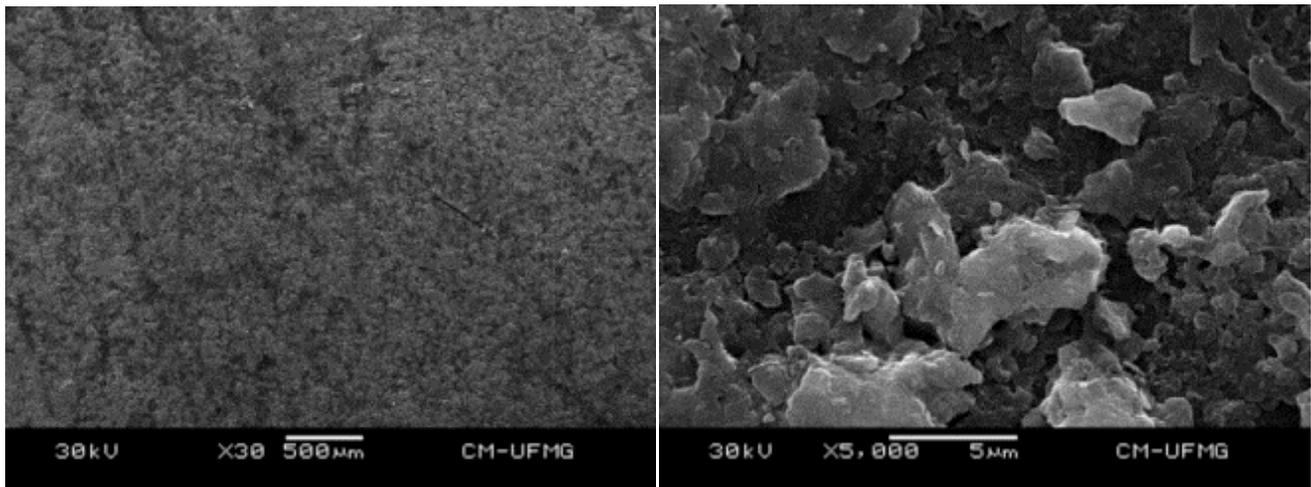


Figura 4.30 – Superfície GMEX-A1 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

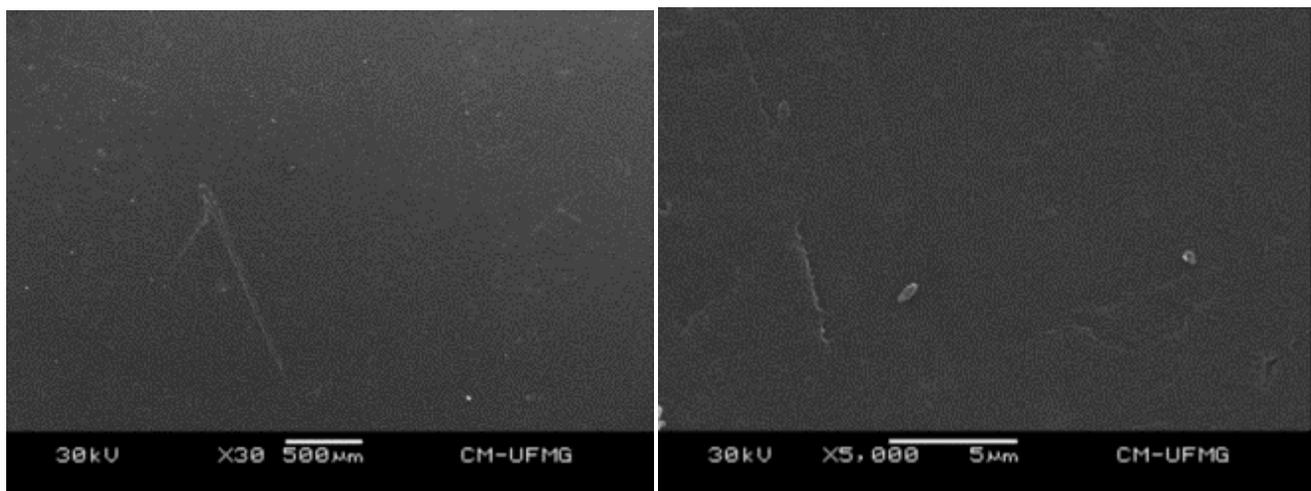


Figura 4.31 – Superfície GMEX-A2 (aumento de 30 e 5000 vezes, respectivamente)

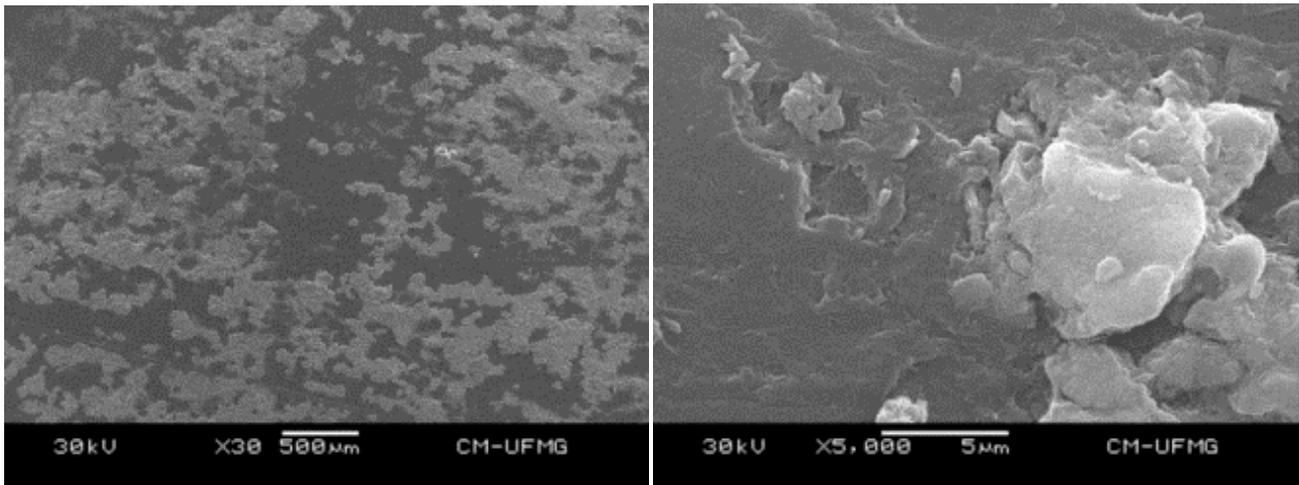


Figura 4.32 – Superfície GMEX-A3 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).

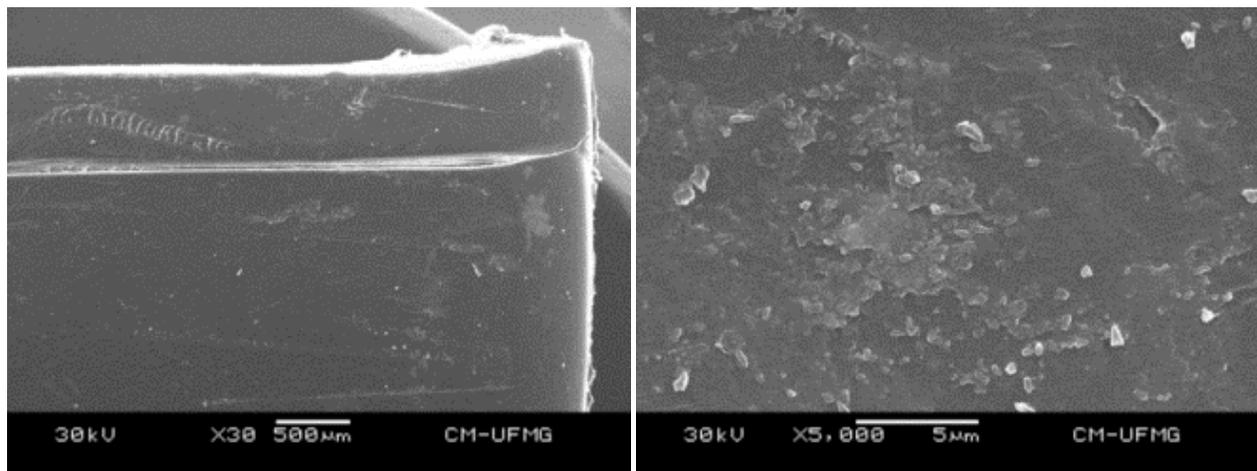


Figura 4.33 – Superfície GMD-A-R1 (aumentos de 30 e 5000 vezes, respectivamente)

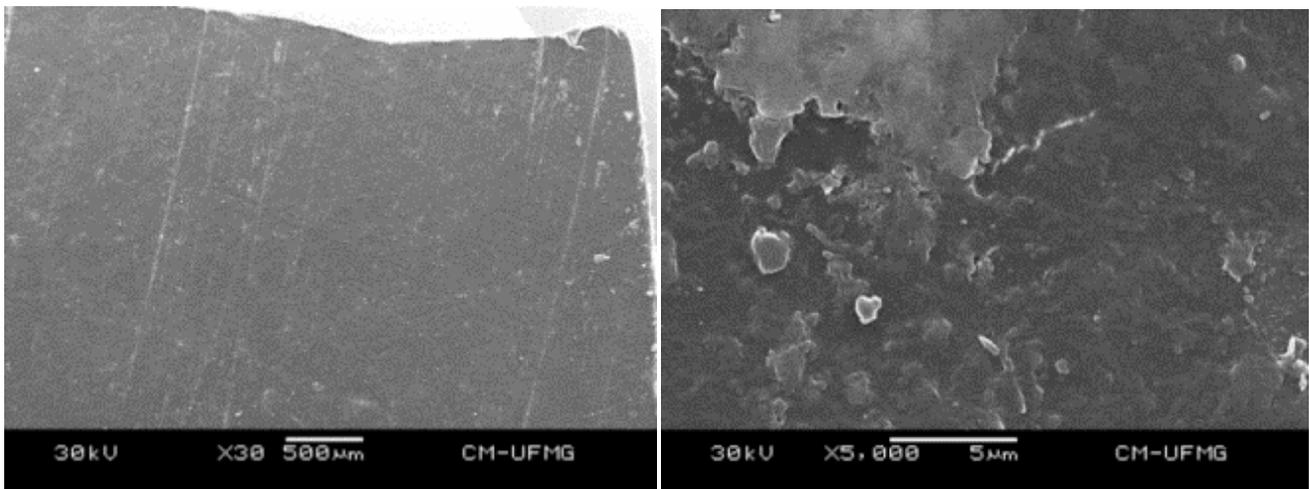


Figura 4.34 – Superfície GMD-A-R4 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente).

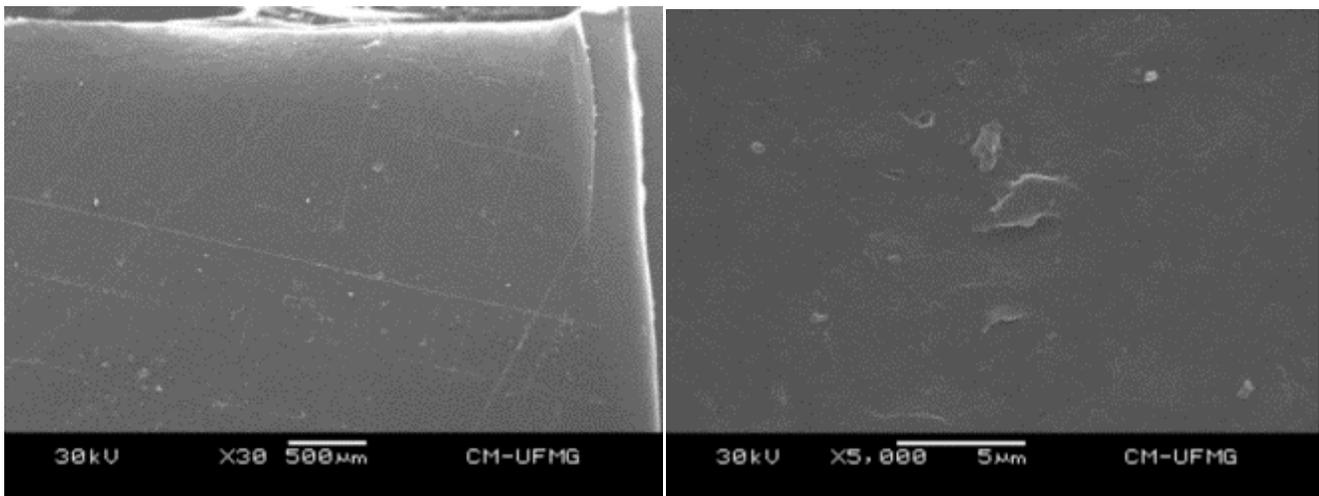


Figura 4.35 – Superfície GME-A-500h (aumentos de 30 e 5000 vezes, respectivamente)

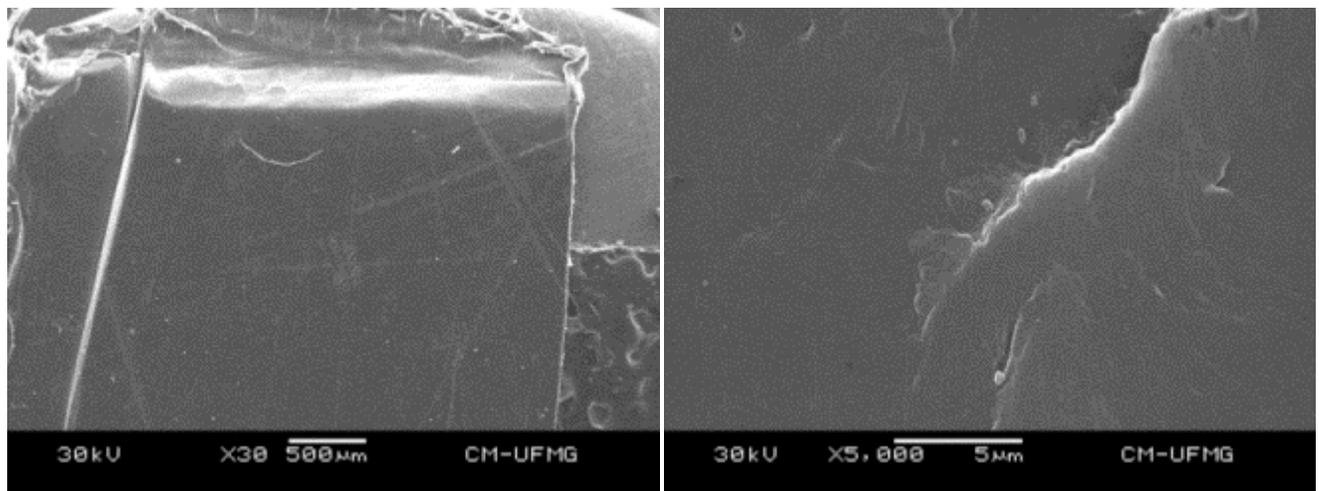


Figura 4.36 – Superfície GME-A-3000h (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

As Figuras 4.37 à 4.42 apresentam as superfícies das geomembranas de PVC do fabricante B para os grupos de amostras, a saber: Virgem (GMV), Exumada (GMEX), Envelhecimento em ensaios de Durabilidade (GMD) e Envelhecimento em Câmara Úmida (GME). Observa-se que as amostras GMV não apresentam aspecto completamente homogêneo sendo possível perceber um nível de rugosidade. A amostra GMEX apresenta vários pontos de degradação com cavidades onde estão alojados materiais poliméricos com formas geométricas prismáticas, ao passo que as amostras dos grupos GMD e GME apresentam uma degradação menos acentuada.

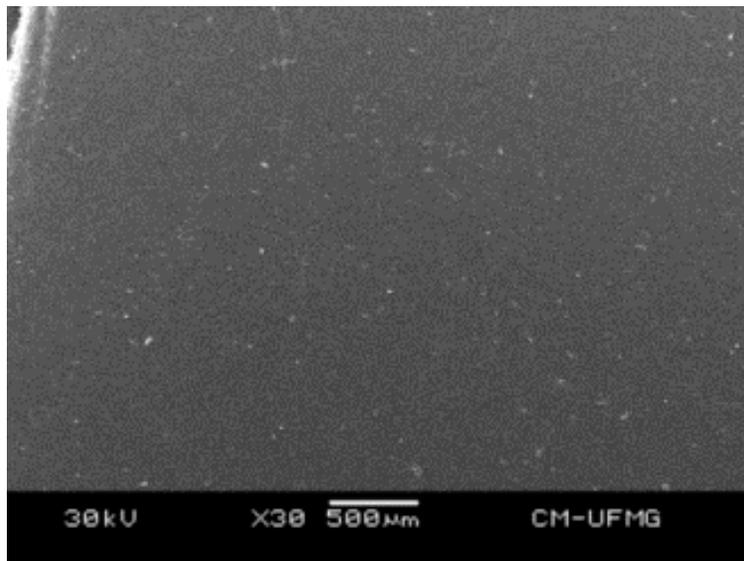


Figura 4.37 – Superfície GMV-B (aumento 30 vezes)

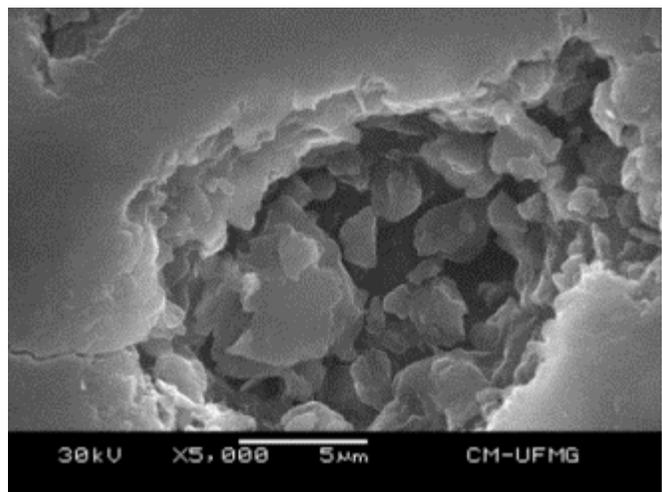
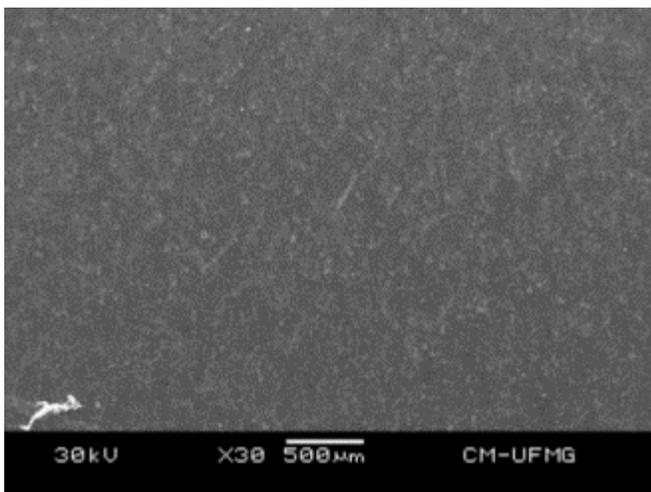


Figura 4.38 – Superfície GMEX-B (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

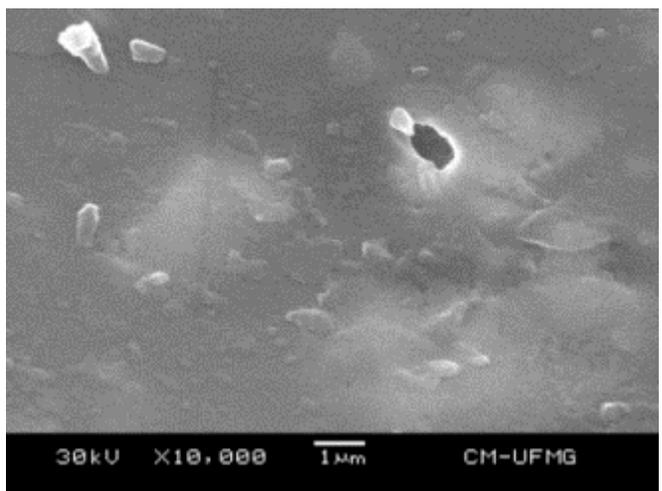
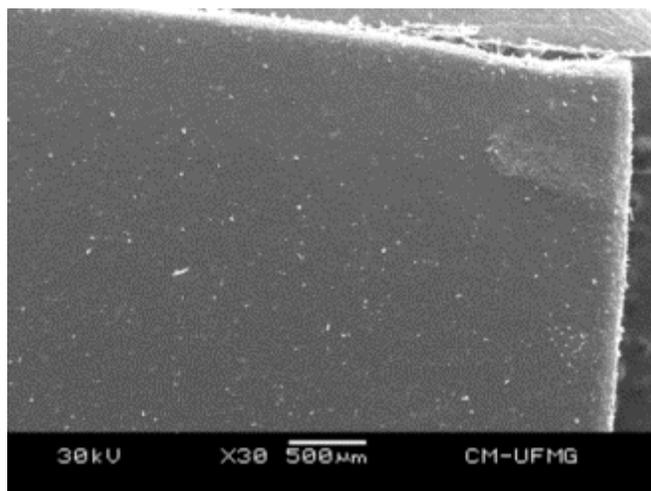


Figura 4.39 – Superfície GMD-B-R1 (aumentos 30 e 1000 vezes, respectivamente)

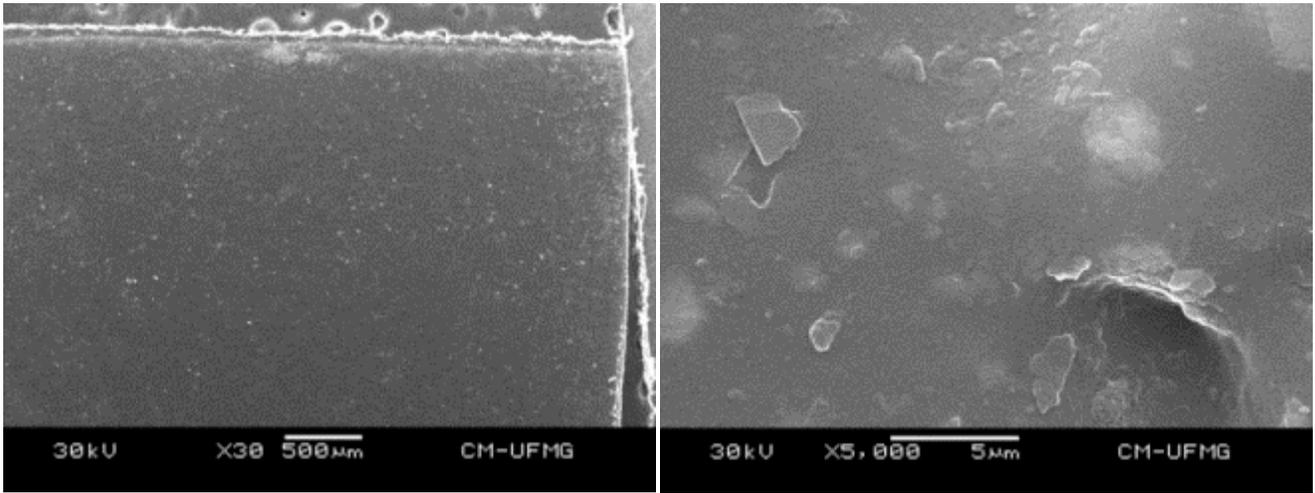


Figura 4.40 – Superfície GMD-B-R4 (aumentos 30 e 5000 vezes, respectivamente)

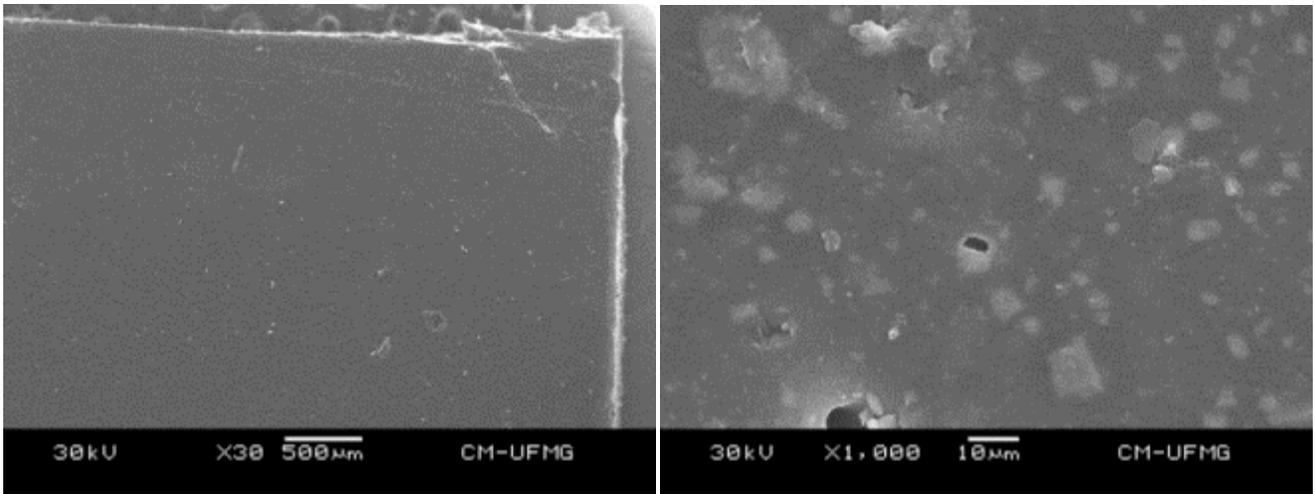


Figura 4.41 – Superfície GME-B-500h (aumento 30 e 1000 vezes, respectivamente)

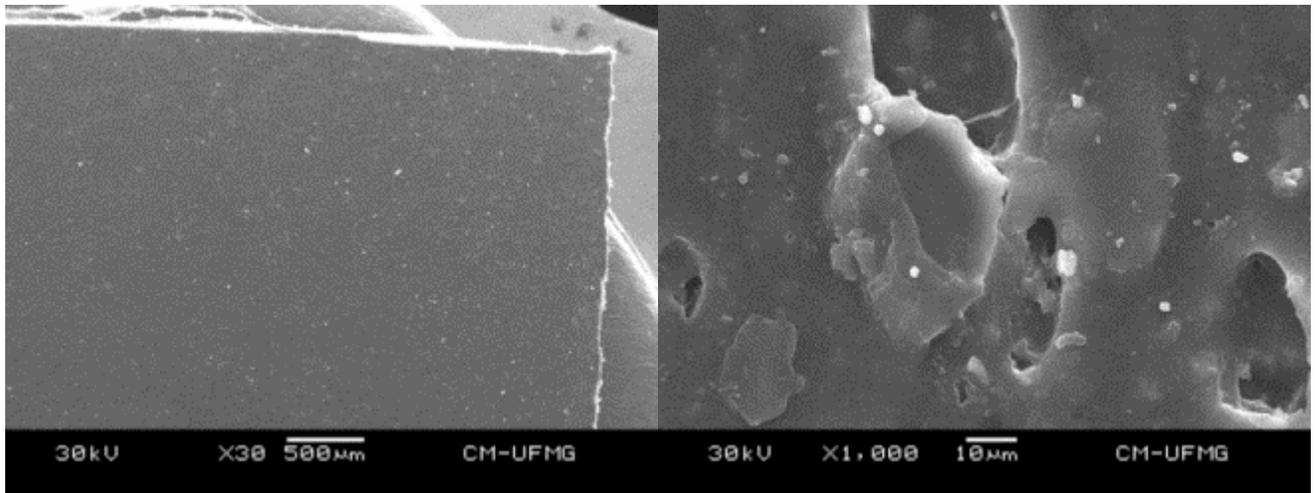


Figura 4.42 – Superfície GME-B-3000h (aumentos 30 e 1000 vezes respectivamente)

Figura 4.43 à Figura 4.49 apresentam as superfícies das geomembranas de PVC do fabricante C para os grupos de amostras, a saber: Virgem (GMV), Exumada (GMEX), Envelhecimento em Ensaio de Durabilidade (GMD) e Envelhecimento em Câmara Úmida (GME). A amostra GMV, apresenta rugosidade e cavidades em sua superfície. Para a GMEX nota-se a superfície totalmente craquelada e com degradação em estágio avançado. Os grupos GMD e GME para os diversos períodos apresentam superfície com certo dano e áreas com grandes alterações.

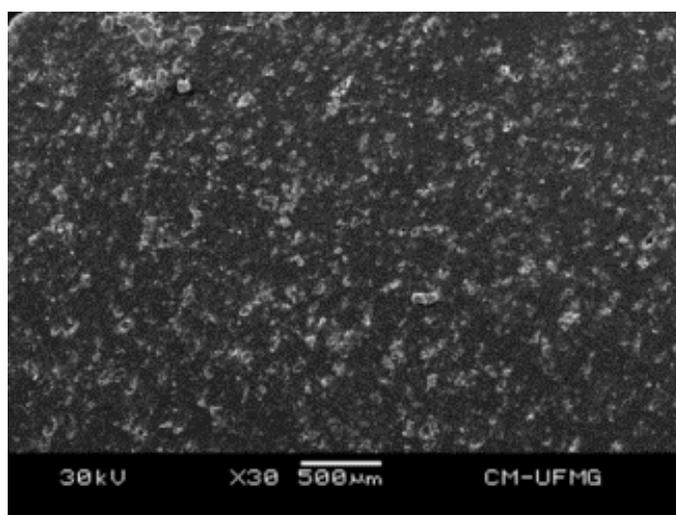


Figura 4.43 – Superfície GMV-C (aumento 30 vezes)

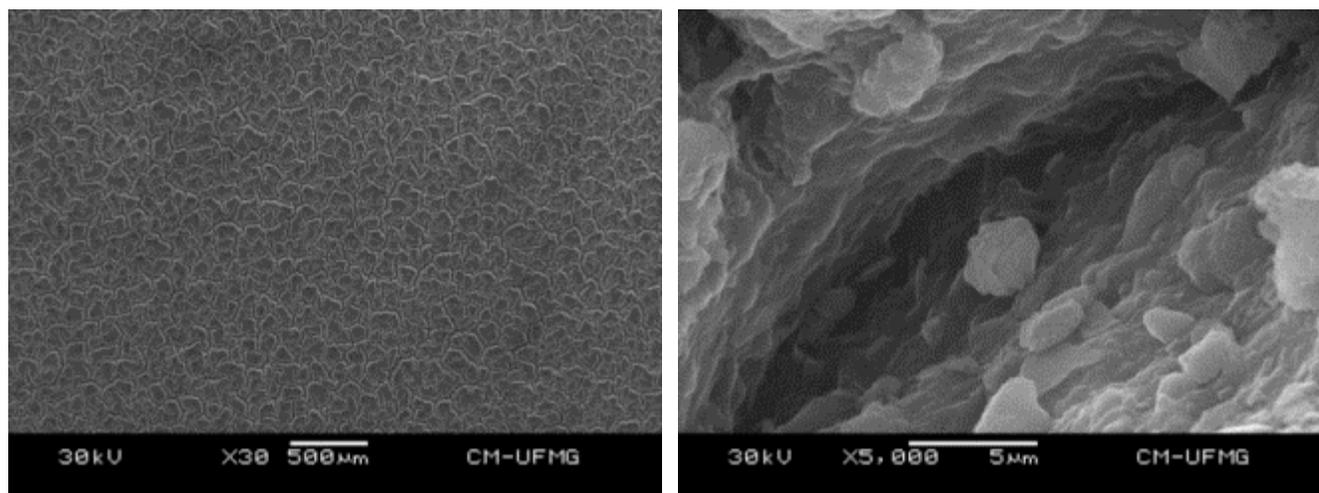


Figura 4.44 – Superfície GMEX-C (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

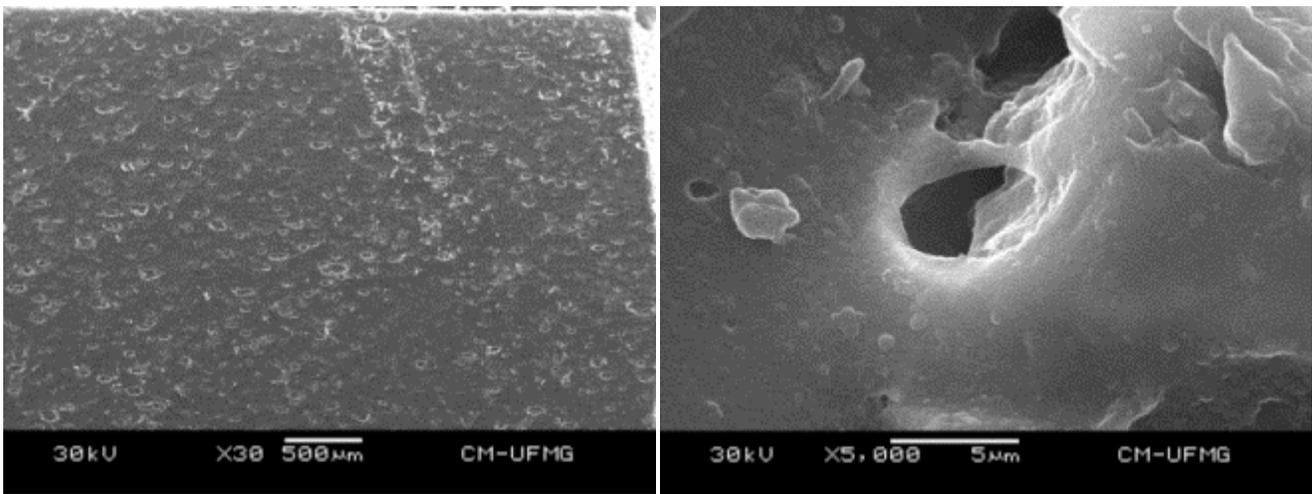


Figura 4.45 – Superfície GMD-C-R1 (aumento 30 e 10000 vezes, respectivamente)

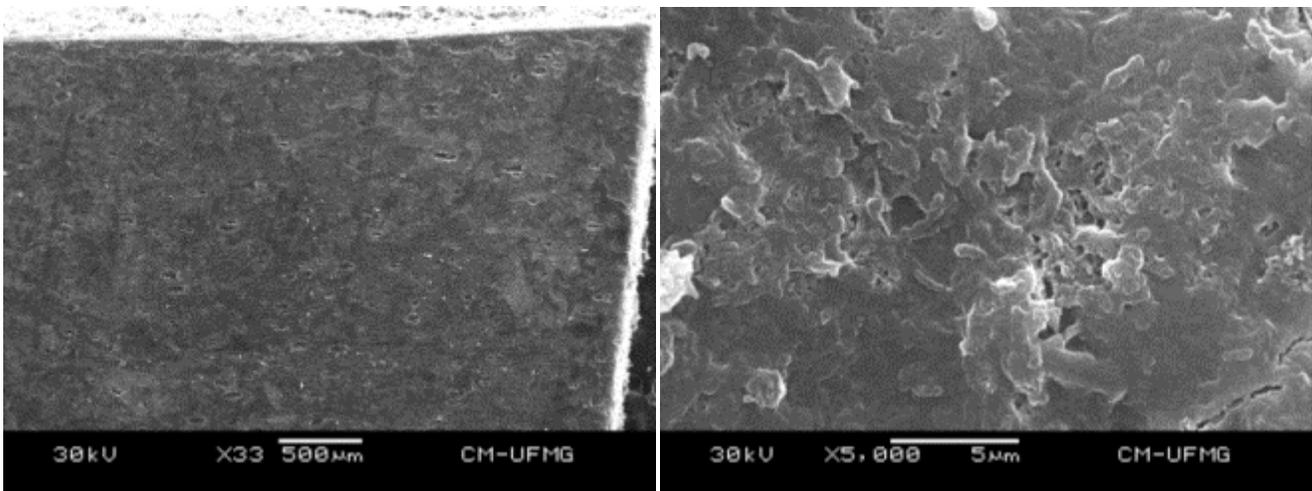


Figura 4.46 – Superfície GMD-C-R4 (aumento 30 e 5000 vezes, respectivamente)

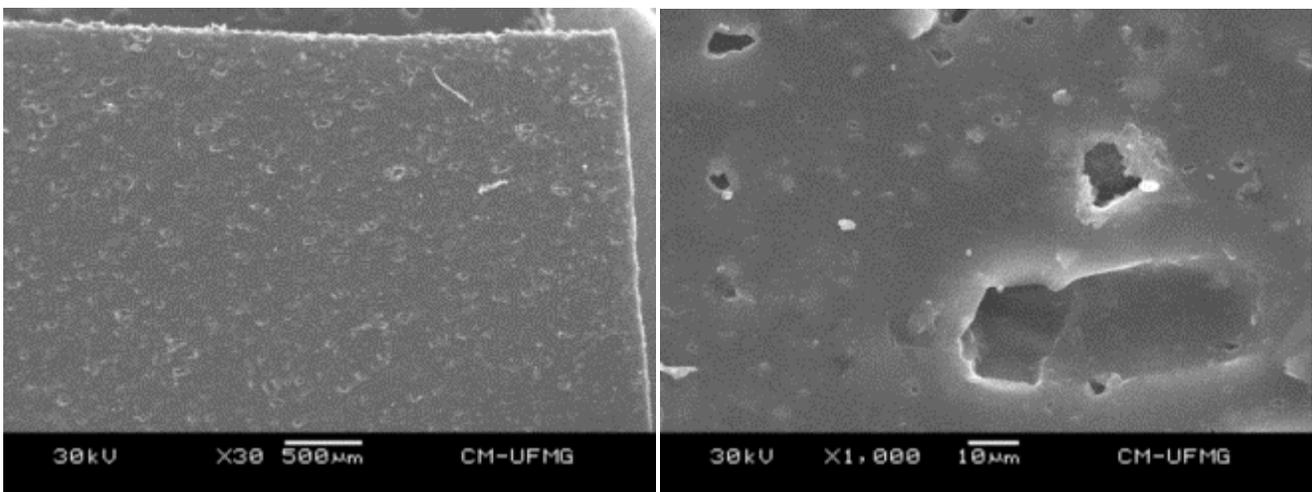


Figura 4.47 – Superfície GME-C-500h (aumentos 30 e 1000 vezes respectivamente)

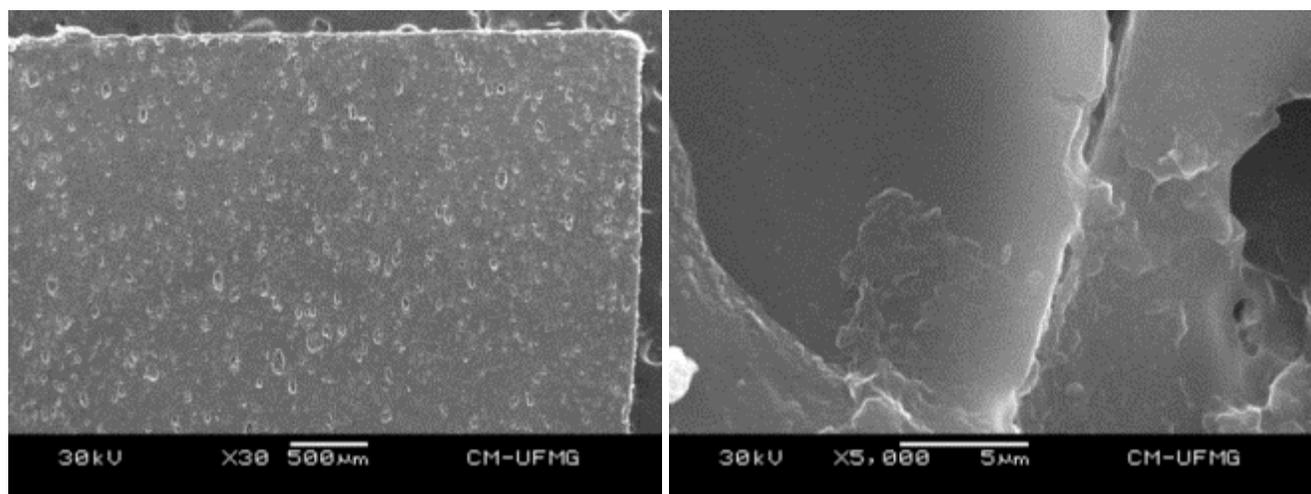


Figura 4.48 – Superfície GME-C-3000h (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

As Figuras 4.49 à 4.54 apresentam as superfícies das geomembranas PVC do fabricante D para os grupos de amostras, a saber: Virgem (GMV), Exumada (GMEX), Envelhecimento Simultâneo (GMD) e Envelhecimento Câmara Úmida (GME). Observa-se que as amostras GMV não apresentam aspecto completamente homogêneo e alguns pontos de rugosidade, entretanto, não aparentam sinais de degradação.

No grupo GMEX as amostras apresentam varias fissuras seguidas de cavidades em sua superfície. As amostras do grupo GMD, R1 e R4 que correspondem 30 e 180 dias respectivamente, mostram o inicio da degradação (R1) e o processo em estágio avançado (R4), com muitas fissuras, porém a degradação não é profunda. Observa-se, também, certa tendência a fissuras.

As amostras do grupo GME na primeira retirada de 500h apresentam em sua superfície algumas cavidades. Para a amostra da última retirada que corresponde 3000h, é possível observar um grau maior de degradação.

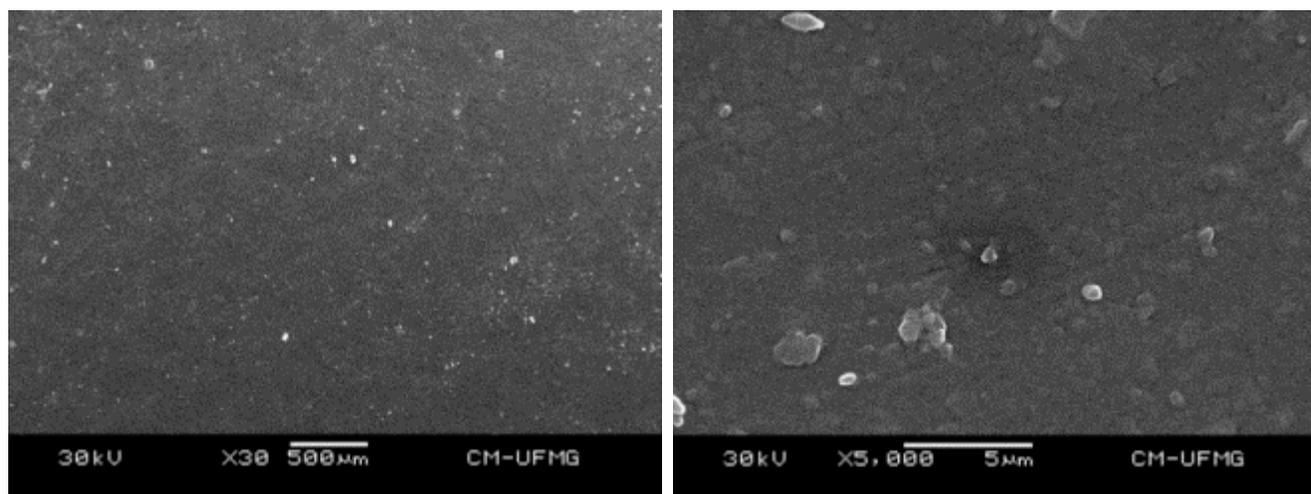


Figura 4.49 – Superfície GMV-D (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

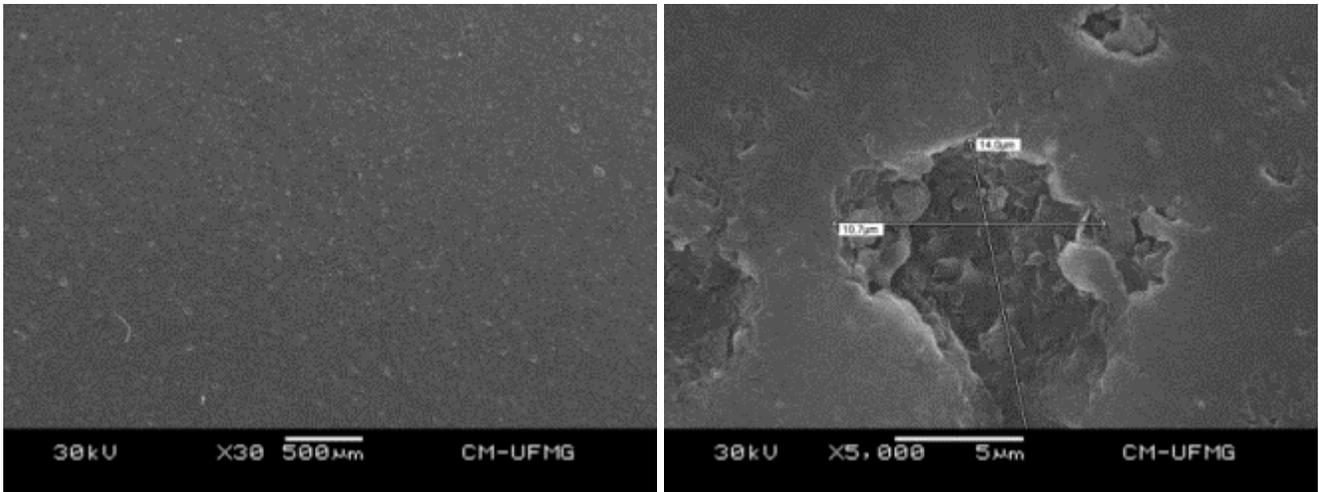


Figura 4.50 – Superfície GMEX-D (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

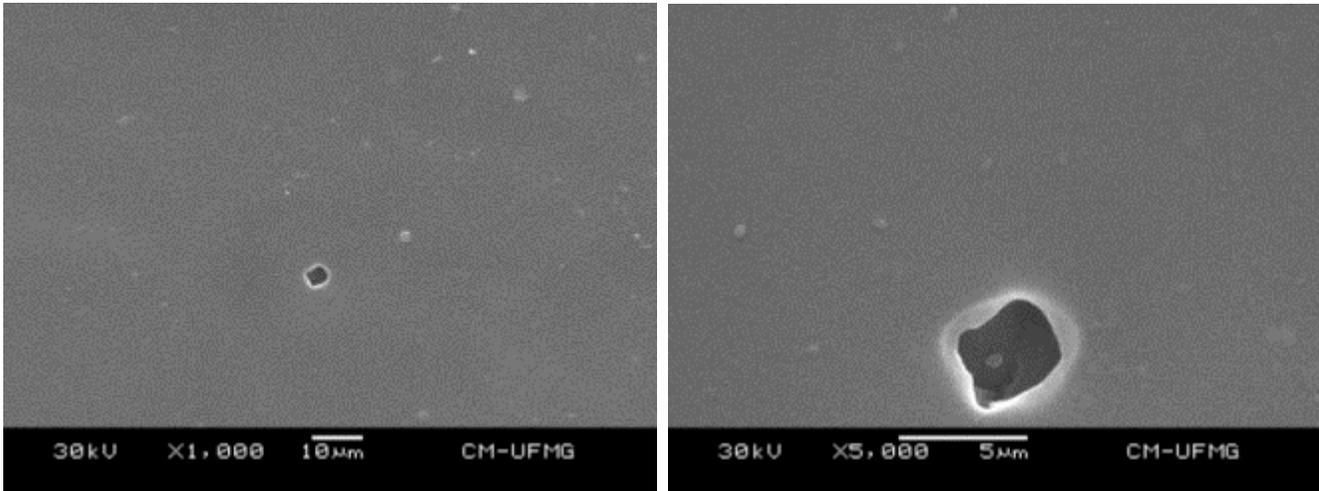


Figura 4.51 – Superfície GMD-D-R1 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

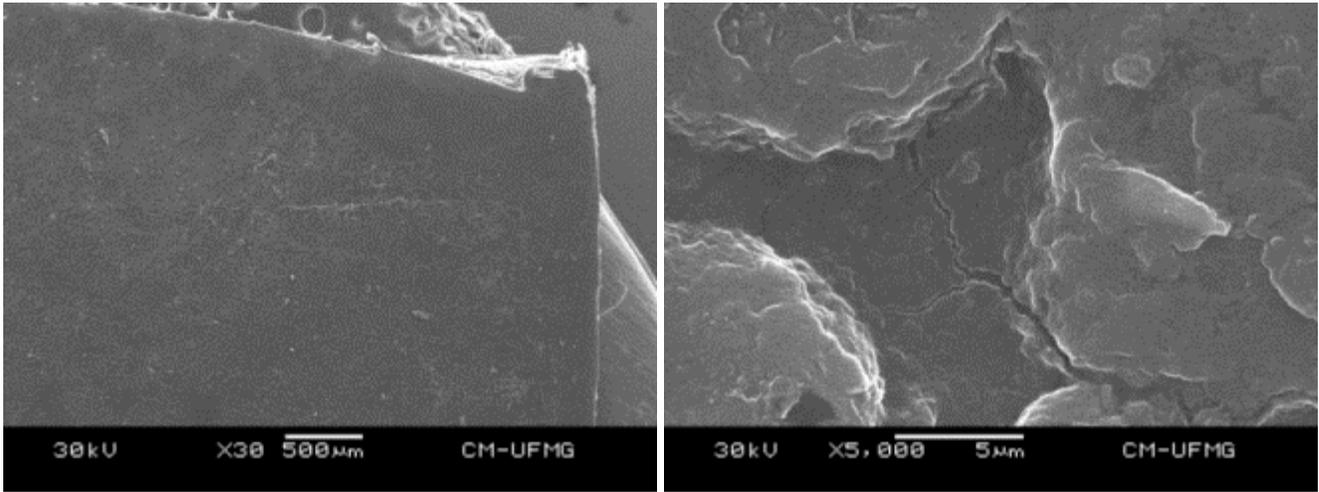


Figura 4.52 – Superfície GMD-D-R4 (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

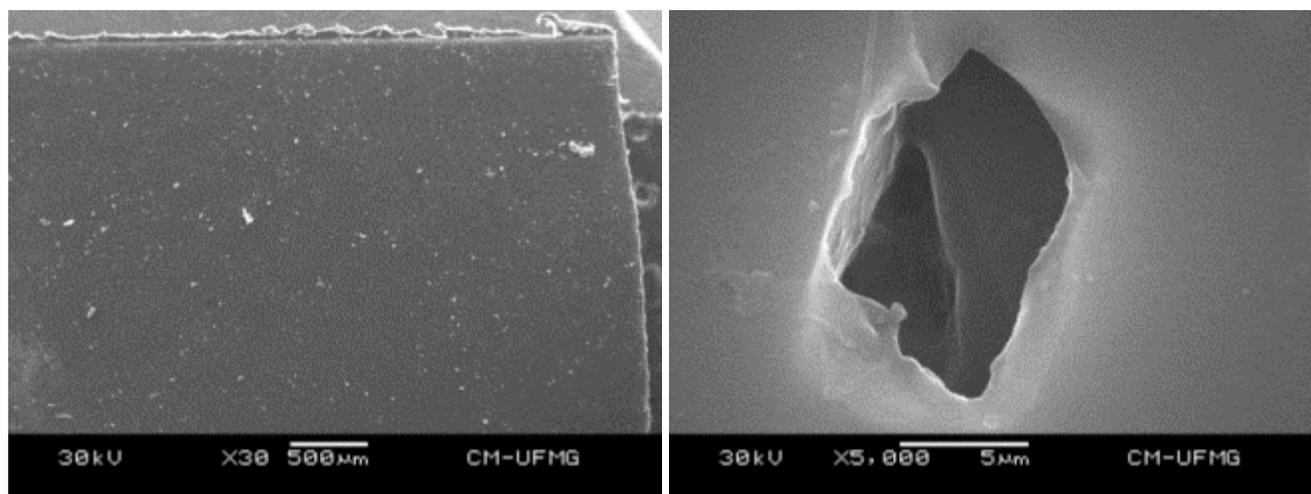


Figura 4.53 – Superfície GME-D-500h (aumentos 30 e 5000 vezes respectivamente)

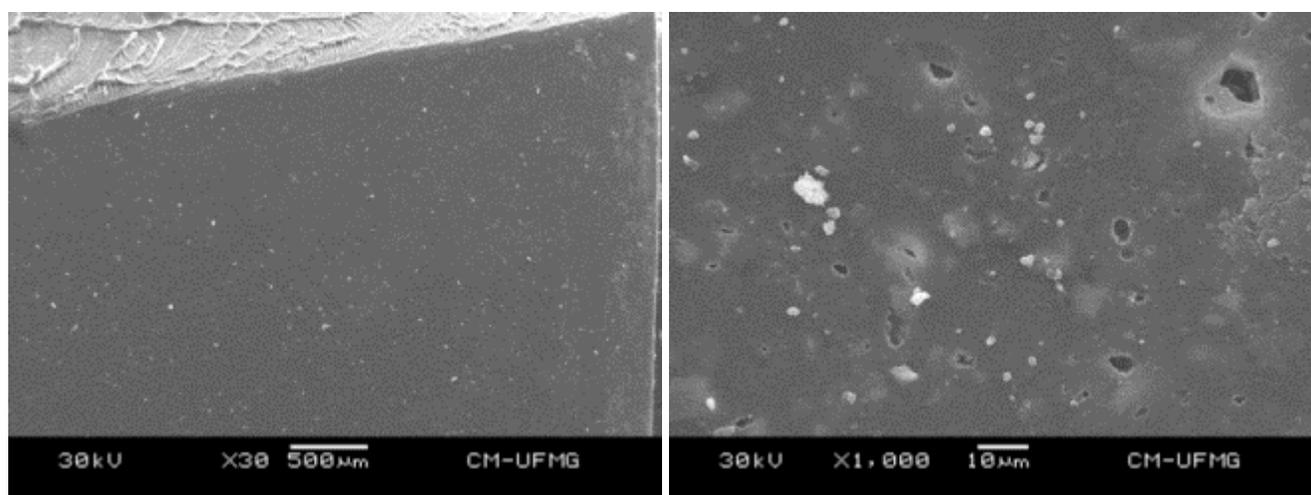


Figura 4.54 – Superfície GME-D-3000h (aumentos 30 e 1000 vezes respectivamente)

4.3.7 Análise Força Atômica

As figuras a seguir apresentam as imagens tridimensionais da análise de força atômica para as geomembranas de HDPE e PVC dos fabricantes A e D, respectivamente. Nas análises verificou-se a altura e a rugosidade nas amostras. A varredura das imagens foi de 10µm vezes para uma tensão de aceleração de 30kV.

A AFM limitou-se somente as duas amostras citadas anteriormente, a amostra A estava em contato direto com um efluente proveniente de drenos de fundo que continham cianeto e a D apresentou rigidez acentuada que lhe confere um aspecto quebradiço. Esta análise teve como objetivo complementar as análises do MEV em relação às medidas das rugosidades das deformações uma vez que aqui tem-se uma visão tridimensional da topografia das deformações. A Tabela 4.5 apresenta os

resultados de rugosidade obtidos para as GM de HDPE e, a Figura 4.55 mostra as imagens tridimensionais das amostras.

Observou-se que amostra GMEX-A1 apresentou maior rugosidade quando comparada à virgem (em média 8 vezes maior), fato que, nas imagens 3D nota-se a irregularidade da superfície da mesma. Os pontos mais claros são as protuberâncias, ao passo que os pontos escuros, são as possíveis cavidades.

Tabela 4.5 – Resultado das rugosidades da amostra HDPE

Amostra	Varredura (μm)	Rugosidade RMS (nm)	Rugosidade Ra (nm)
GMV-A	10	40	30
GMEX-A1	10	321	250

Nota: (a) Ra – Média aritmética dos valores absolutos
 (b) RMS – Desvio médio quadrático

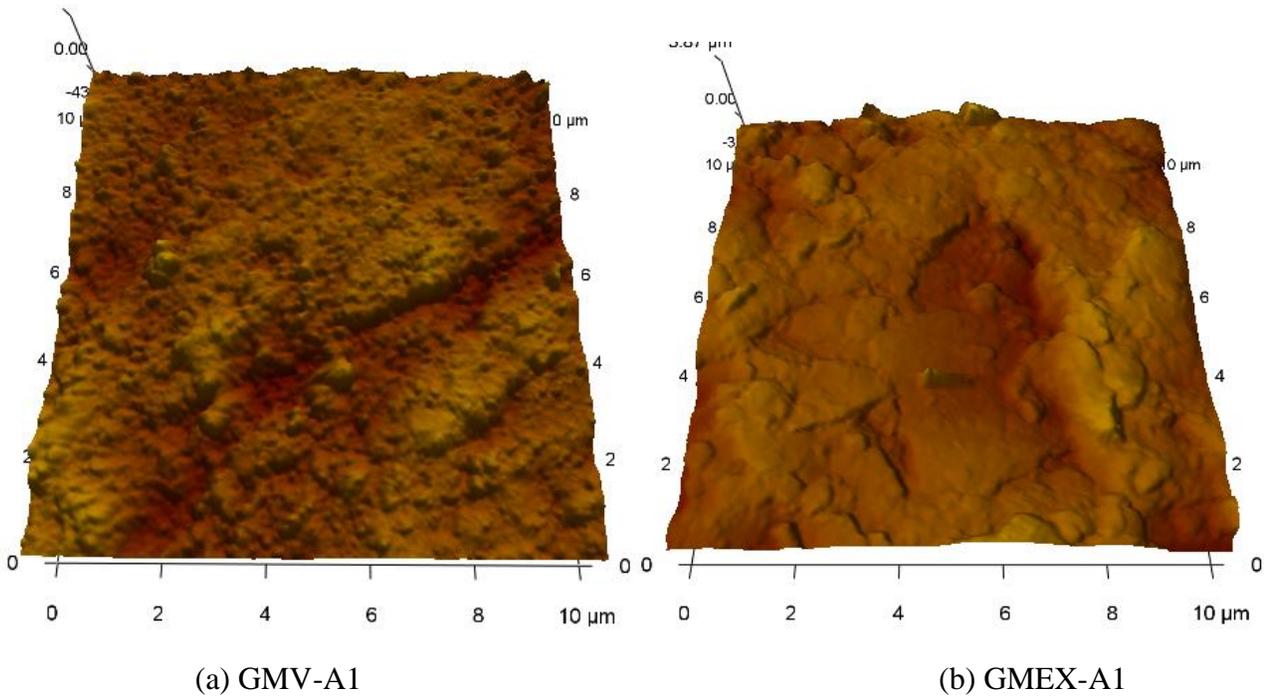


Figura 4-55 – Superfície tridimensional das geomembranas – Varredura 10 μm

A Tabela 4-6 apresenta os resultados de rugosidade das amostras de PVC e a Figura 4.55 as imagens tridimensionais das amostras.

Percebe-se que amostra GMEX apresentou maior rugosidade quando comparada à virgem (em média 9 vezes), fato que, nas imagens 3D nota-se pela irregularidade da superfície da mesma. Os pontos mais claros são as protuberâncias ao passo que os pontos escuros possíveis cavidades.

Tabela 4-6 – Resultado das rugosidades da amostra PVC

Amostra	Varredura (μm)	Rugosidade RMS (nm)	Rugosidade Ra (nm)
GMV-D	10	16	12
GMEX-D	10	138	108

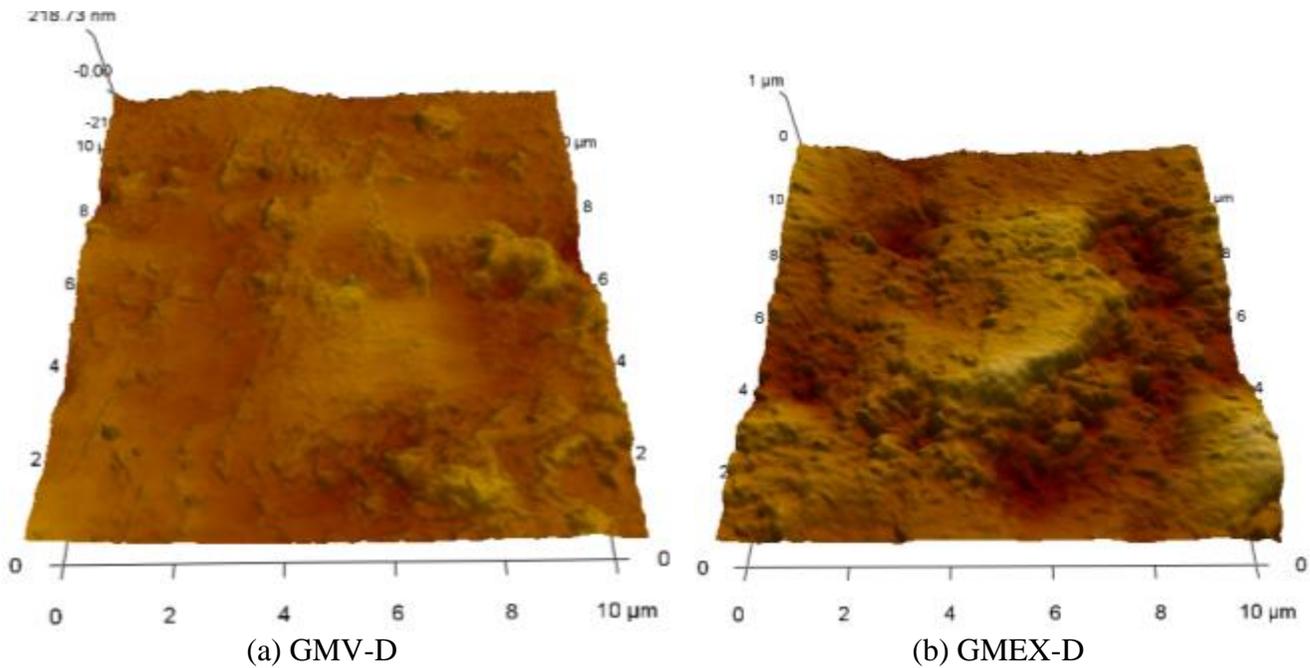


Figura 4-56 – Superfície tridimensional das geomembranas – Varredura 10 μm

4.4 Discussão dos resultados obtidos

A seguir apresenta-se uma breve discussão sobre os resultados obtidos em todas as amostras analisadas.

Koerner (2005) recomenda valores mínimos de tensão máxima e deformação para GM de HDPE e PVC, a seguir apresenta-se:

Tabela 4-7 – Propriedades mecânicas GM faixa larga – Korner (2005)

Propriedades	Unidade	HDPE (1,50mm)	PVC (0,75mm)
Tensão máxima	MPa	15,90	13,80
Deformação específica na ruptura	%	-	210
Deformação específica no escoamento	%	15	-

Os valores apresentados acima serão utilizados como referência para a discussão dos resultados dos ensaios a Resistência a Tração Simples para as amostras de HDPE e PVC.

4.4.1 Fabricante A - HDPE

As propriedades físicas como espessura e densidade da amostra A (HDPE), demonstraram que as amostras se comportaram de maneira distinta para os diversos grupos. Para as amostras exumadas, de maneira geral, a espessura apresentou-se superior quando comparada a virgem (em média 5%). Fato que não ocorreu com as amostras envelhecidas por meio dos ensaios de durabilidade, as quais se mantiveram com espessuras praticamente iguais. A geomembrana virgem apresentou variação da espessura ao longo do painel, variando de 1,50 a 1,75mm.

Segundo Rowe (2010), o incremento e redução na espessura podem ser devido à redução de antioxidantes (AO) na geomembrana. A degradação oxidativa dá-se em três fases: (I) depleção AO; (II) tempo de indução até o início de degradação do polímero; (III) degradação por falha.

Analisando-se a densidade, nota-se que a as geomembranas virgens apresentaram densidade (em média 2%) superior quando comparado às exumadas, que apresentaram densidade abaixo de 0,94g/m³. De maneira sucinta comenta-se sobre essas duas observações:

- Segundo a ASTM D792-13 a densidade do HDPE deve ser maior ou igual a 0,94g/m³,

- Recomenda-se que este valor se encontre entre 0,941 e 0,950g/cm³, pois presume-se que valores mais altos estejam correlacionados com elevado grau de cristalinidade e, por conseguinte uma geomembrana mais rígida e mais quebradiça.

Com base no exposto as amostras virgens e exumadas não atenderiam ao recomendado em termos de densidade.

Sobre a resistência mecânica das amostras, nota-se que a deformabilidade no escoamento das amostras virgens, exumada A3 e envelhecida em ensaios de laboratório, encontram-se em torno de 14%, ao passo que as amostras exumadas A1 e A2 apresentaram deformabilidade média de 19%. Ressalta-se que as deformabilidades observadas são superiores ao mínimo recomendado pelo fabricante (no caso 13%).

Com relação à rigidez, todas as amostras apresentaram valores inferiores ao apresentado pelo fabricante. No entanto, cabe ressaltar que as GMV apresentaram características similares as GMEX-A3 e GMD, ao contrário do que era esperado, ou seja, que as GMV apresentassem propriedades superiores às exumadas e envelhecidas.

As análises de Termogravimetria demonstraram que todas as amostras de HDPE não estão dentro dos limites sugeridos por Koerner (2005), a saber: 97 a 97,5% de polietileno e 2 a 3% de negro de fumo. A amostra GMV apresenta somente 0,52% de negro de fumo que é responsável pela proteção UV, e as demais amostras não apresentaram negro de fumo.

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura mostraram que a amostra GMV apresentou superfície com certo grau de rugosidade. As amostras GMEX-A1 e A3 mostraram um grau de degradação enquanto a GMEX-A2 não apresentou sinais de degradação, bem como ocorreu para as amostras GME. Com relação às amostras GMD observou-se certo nível de degradação, mas não na intensidade observada nas amostras GMV, GMEX-A1 e A3.

As análises de Força Atômica mostraram que a altura das protuberâncias nas amostras (rugosidade) da amostra exumada A1 foi maior quanto comparada a GMV; isso corrobora o que foi observado no MEV, confirmando-se a degradação da amostra.

Ressalta-se que as amostras virgens foram enviadas diretamente da obra para o laboratório da UFMG, sendo que visualmente as amostras não apresentavam sinais de degradação ou uso, porém conjectura-se que as mesmas não tenham sido armazenadas de maneira adequada, ficando expostas às intempéries. Deste modo, pode-se desencadear um processo de degradação antes de entrar em operação.

4.4.2 Fabricante B - PVC

As propriedades físicas das amostras B de PVC apresentaram comportamento similar para os diversos grupos. As espessuras das amostras do grupo GMV são superiores comparadas as GMEX e GMD. A densidade das amostras GMEX se apresentou mais alta comparada as GMV, no entanto, as GMV apresentaram densidade superior as GMD.

Na resistência mecânica das amostras nota-se que a deformabilidade na ruptura das GMEX apresentaram-se 43% menor quando comparada as GMV, ao passo que as GMD mantiveram uma deformação específica similar a GMV. Quanto à rigidez as amostras GMEX foram as que apresentaram uma rigidez mais acentuada (em torno de 6,5MPa), valor muito superior ao preconizado pelo fabricante no caso 4MPa aproximadamente. As amostras GMD apresentaram rigidez em torno de 5MPa.

As análises de Termogravimetria demonstraram que as amostras GMV e GMD apresentaram parâmetros similares, no entanto a GMEX apresentou uma perda de massa superior quando comparadas as demais.

As análises de Microscopia Eletrônica por Varredura mostraram que a amostra GMV não apresentou sinais de degradação. As amostras GMEX apresentaram sinais acentuados de degradação, enquanto as amostras GMD e GME apresentaram sinais de degradação menos acentuados.

A amostra do fabricante B, que foi instalada em 2009 apresentou decréscimo em suas propriedades e um grau de degradação nas amostras exumadas, bem como sinais de degradação também foram observados para as demais amostras submetidas aos demais métodos de envelhecimento.

4.4.3 Fabricante C – PVC

As propriedades físicas das amostras C de PVC apresentaram comportamento similar aos diversos grupos. As espessuras das amostras do grupo GMV são superiores comparadas as GMEX e GMD. A densidade das amostras GMEX se apresentaram mais baixas que as GMV, no entanto as GMV apresentaram densidades inferiores as GMD a respeito das massas observou-se acréscimos das mesmas para as GMD.

Sobre a resistência mecânica das amostras nota-se que a deformabilidade na ruptura das amostras GMEX e GMD se encontram em torno de 150%, ao passo que as amostras GMV e GME apresentaram deformabilidade média de 200 e 250% respectivamente. Ressalta-se que as deformabilidades observadas para as GMEX e GMD são inferiores às recomendadas pelo fabricante (no caso 200%).

Com relação à rigidez todas as amostras apresentaram valores que se compreendem entre 6 e 12MPa, valores estes que superam o indicado pelo fabricante 4,50MPa. Por conseguinte nota-se que as amostras apresentam certo grau de degradação.

Através da análise termogravimétrica foi possível perceber que os parâmetros de todas as amostras estão na mesma ordem de grandeza. Destaca-se que a amostra virgem deveria ter apresentado menor queima devido sua condição, ou seja, um produto sem uso.

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura mostraram que a amostra GMV apresentava sinais de degradação em sua superfície e, foi possível observar certa rugosidade e a presença de cavidades. Para as amostras GMEX a superfície apresentou-se craquelada e com cavidades acentuadas, bem como para as amostras da GMD e GME.

O grau de degradação observado nas amostras virgens que foram envelhecidas em laboratório pode estar relacionado com o estado da amostra virgem. As amostras ditas virgens foram enviadas diretamente da obra para o laboratório da UFMG. Visualmente as amostras não apresentavam sinais de degradação ou uso, porém presume-se que as mesmas não tenham sido armazenadas de maneira adequada, ficando expostas as intempéries e, desta maneira desencadeando-se um processo de degradação antes mesmo de entrar em operação. A referida geomembrana foi instalada no ano de 2011, porém a mesma apresentou-se com propriedades inferiores ao recomendado pelo fabricante.

4.4.4 Fabricante D - PVC

Nas propriedades físicas das amostras D do grupo GMEX percebeu-se um decréscimo acentuado da espessura em média 18% comparado com a GMV. As amostras GMD apresentaram redução na espessura em torno de 2,5%.

Com relação à densidade todas as amostras apresentaram-se dentro da faixa de 1,33 e 1,40g/cm³, exceto as amostras GMV e GMEX que apresentaram densidade de 1,20g/cm³ e 1,44g/cm³ respectivamente. A diferença entre as densidades das GMV e GMEX está em torno de 17%.

Em relação à resistência mecânica das amostras nota-se que a deformabilidade no escoamento das amostras GMEX foi da ordem de 20%, ao passo que na GMV foi da ordem de 320%. As outras amostras como as GMD e GME encontram-se com 290 e 380% respectivamente.

Com relação à rigidez, todas as amostras apresentaram valores que compreendem entre 4,20 e 5,30MPa, exceto a amostra GMEX, que apresentou média de 235MPa, esse valor demonstra o alto grau de rigidez das amostras, o que conduz a uma alta taxa de descoloração e conseqüentemente muito quebradiça.

As análises de Microscopia Eletrônica por Varredura mostraram que a amostra GMV não apresentava sinais de degradação em sua superfície, no entanto as amostras GMEX apresentaram-se com cavidades acentuadas, bem como para as amostras da GMD. A amostra GME apresentou algumas cavidades e alguns pontos de descoloração em sua superfície.

As análises de Força Atômica mostraram que a altura das protuberâncias nas amostras (rugosidade) exumadas foi maior quando comparada a GMV, isso corrobora o que foi observado no MEV, confirmando-se a degradação da amostra, ainda que não foi possível verificar a rigidez da amostra nessa análise.

A geomembrana de PVC em questão foi instalada no ano de 2006, porém o alto grau de degradação dessa amostra gera incertezas quanto sua durabilidade e função de impermeabilização dos espadares no futuro próximo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações finais

5.1.1 Quanto aos equipamentos e Método utilizado

Devido ao grande número de amostras e à diversidade de ensaios a realizar, foi possível observar o comportamento das geomembranas em diversas situações e, principalmente observar outras constatações como, início do processo de degradação dos *liners* que não foram armazenados de maneira adequada e que tiveram perdas em suas propriedades antes mesmo de serem instaladas.

A análise térmica empregada, no caso a Termogravimétrica (TGA) não foi capaz de avaliar de maneira conclusiva a degradação dos polímeros, pois a variação entre as perdas de massa entre os grupos foi pequena, no entanto foi imprescindível para identificação dos compostos das geomembranas. De acordo com outras pesquisas os ensaios de Tempo de Oxidação (OIT) e Tensão sob Fissuramento para o HDPE são mais eficientes, da mesma maneira que o valor k é mais adequado para medir a degradação no PVC.

A análise de Microscopia Eletrônica por Varredura se apresentou muito efetiva, pois, ao contrário das outras análises, este foi capaz de avaliar sinais de degradação nas amostras em todos os grupos. Sobre todo, evidenciou a degradação das amostras A e C que tinha sido recebida pelo laboratório da UFMG como virgens.

As análises de Força Atômica (AFM) apresentou-se um método de análise relevante quando utilizado de maneira conjunta com a MEV, pois, é capaz de definir a altura das protuberâncias (rugosidade) nas amostras.

Como relação às propriedades mecânicas, o ensaio de Resistência a Tração Simples e os ensaios de espessura e densidade, comumente utilizados como parte da verificação das propriedades, são ferramentas úteis e efetivas para a análise da estrutura das geomembranas virgens e envelhecidas.

De maneira geral, o resultado do estudo possibilita concluir que as geomembranas exumadas de PVC e de HDPE apresentaram tendência de diminuição da deformabilidade e aumento da rigidez, apresentando certo grau de degradação como demonstrado pelas propriedades físicas e mecânicas

avaliadas. As geomembrana de PVC, no entanto, apresentaram degradabilidade mais pronunciada. Algumas amostras de PVC apresentaram também redução de massa após a imersão no fluido contendo cianeto, no entanto para alguns processos de envelhecimento várias amostras de PVC apresentaram-se mais dúcteis.

Os processos de envelhecimento acelerado realizados em laboratório podem ser superestimados e talvez não reflitam a realidade de exposição no campo, entretanto os resultados obtidos em laboratório devem ser considerados como uma tendência de perda de resistência e degradação das geomembranas e, portanto, devem ser analisados de maneira qualitativa.

5.1.2 Comportamento das geomembranas

Com base nos resultados obtidos e comparações realizadas nas amostras virgens, exumadas e envelhecidas, foi possível avaliar o comportamento físico, mecânico e conseqüentemente algumas alterações nas propriedades. Apresentam-se as principais conclusões do estudo:

- O processo de envelhecimento em ensaios de durabilidade em laboratório, que utilizou a radiação de infravermelho, a radiação ultravioleta e a imersão em fluido cianetado, demonstrou-se ser uma ferramenta que pode ser utilizada como indicativo do processo de degradação. No entanto, necessita de avaliações mais profundas complementadas por outros ensaios;
- Algumas amostras exumadas apresentaram processo de degradação similar às amostras envelhecidas em ensaios de durabilidade sob a ação de radiação ultravioleta, radiação infravermelha e imersão em fluido cianetado;
- As amostras que foram submetidas ao processo de envelhecimento na Câmara Úmida com atmosfera saturada e temperatura constante de 40°C, apresentaram resultados de propriedades físicas e mecânicas semelhantes quando comparado às amostras virgens. Portanto, conclui-se que as geomembranas resistem de maneira adequada a esse tipo de ambiente;
- As amostras que foram submetidas ao processo de envelhecimento em ensaios de durabilidade apresentaram maiores decréscimos em suas propriedades físicas e mecânicas, quando comparadas com o processo de envelhecimento na Câmara Úmida.
- A geomembrana de PVC do Fabricante D, que foi instalada na barragem em 2006, apresentou elevada rigidez e estrutura quebradiça, conseqüentemente, conclui-se que houve uma redução significativa em sua vida útil;

- Os ensaios mostraram que as amostras armazenadas de forma incorreta, ainda que virgens, apresentaram decréscimo significativo nas propriedades físicas e mecânicas a ponto dos resultados se igualarem às propriedades das geomembranas envelhecidas;

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Realização de ensaios em amostras exumadas que estão cobertas por rejeito nos espaldares do reservatório;
- Realizar ensaio de Tempo de Oxidação (OIT) nas amostras de HDPE para verificar uma possível oxidação da membrana em contato com fluido agressivo;
- Realizar ensaio de Fissuramento sob Tensão nas amostras (*Stress Cracking*) de HDPE;
- Realização de ensaios mecânicos em amostras degradadas em fluido cianetado;
- Realização de ensaios mecânicos em amostras exumadas, como: resistência ao rasgo e puncionamento;
- Aumentar o tempo dos ensaios no Envelhecimento em ensaios de durabilidade com objetivo de verificar a continuidade do decréscimo ou estabilização nas propriedades físicas e mecânicas;

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D1505 (2010). Standard test method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique
- ASTM D297 (2013). Standard Test Methods for Rubber Products - Chemical Analysis
- ASTM D3020 (1989). Specification for Polyethylene and Ethylene Copolymer Plastic Sheeting for Pond, Canal and Reservoir Lining (Withdrawn 1996, no replacement)
- ASTM D3083 (1989). Specification for Flexible Poly (Vinyl Chloride) Plastic Sheeting for Pond, Canal, and Reservoir Lining (Withdrawn 1989, no replacement)
- ASTM D3253 (1981). Specification for Vulcanized Rubber Sheeting for Pond, Canal and Reservoir Lining – (Withdrawn 1989, no replacement)
- ASTM D3254 (1981). Specification for Fabric-Reinforced Vulcanized Rubber Sheeting for Pond, Canal and Reservoir Lining (Withdrawn 1989, no replacement)
- ASTM D3776/D3776M-09a (2013). Standard Test Methods for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric
- ASTM D4439 (2011). Standard Terminology for Geosynthetics
- ASTM D5199 (2012). Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics
- ASTM D5994 (2010). Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes
- ASTM D6370 (2009). Standard Test Method for Rubber - Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA)
- ASTM D6693 (2010). Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Non reinforced Flexible Polypropylene Geomembranes
- ASTM D7176-6 (2011). Standard Specification for Non-Reinforced Polyvinyl Chloride (PVC) Geomembranes Used in Buried Applications
- ASTM D792 (2013). Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
- ASTM D882 (1983). Standard Test Methods Tensile Properties of Thin Plastics Sheeting
- ASTM D883 (2012). Standard Terminology Relating to Plastics
- ASTM G154ae1 (2000). Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.
- A.D. NEEDHAM, J.W.N. SMITH, E.M.G. GALLAGHER (2006). The service life of polyethylene geomembrane barriers. Engineering Geology, 2006, Vol.85(1-2)

AGNELLI, J.A.M. (2000). Introdução a Materiais Poliméricos, Apostila, DEMA, UFSCar, São Carlos, 282 p.

BUENO, MARUSKA T. N. S. (2007). Análise da Degradação de Alguns Geossintéticos em Contato com Fluidos Agressivos Tese de Doutorado–Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.

BUENO B.S.(2003). Propriedades, Especificações e Ensaio-IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos2003) e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2003), 20 a 23 de maio de 2003, PUC, Porto Alegre (RS)

CARVALHOS A, F. (2011). Efeito do Teor em Água do Solo na Interação Solo-Geossintético - Departamento de Engenharia Civil- Universidade de Aveiro

COLMANETTI, J.P (2006). Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da Face de montante de barragens de enrocamento, Publicação nº G. TD-037/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272p.

COSTA, C. M. L. et al. (2008). Uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos da Face de Montante de Barragens de Enrocamento, Publicação nº G.TD-037/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272 p.

DUNCAN O.M, L.O. GUMBE, G.O RADING (2011). Analysis of Natural Degradation of High-Density Polyethylene Lining Time-Dependent Properties – Polymer Engineering and Science

DUDZIK, B. E. and TISINGER, L. G. (1990) - An Evaluation of Chemical Compatibility Test Results of High Density Polyethylene Geomembrane Exposed to Industrial Waste Leachate, pp 37-54, Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, ASTM STP 1081, Robert M. Koerner, editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

DUQUENNOI, C., BERNAHRD, C., GAUMET, S. (1995) - Laboratory Aging of Geomembranes in Landfill Leachates, Proceedings Sardina 95, Fifth International Landfill Symposium, Italy, 1995, pp. 397-404.

E. J. NEWMAN and T. D. STARK (2004). Thirty-Year Durability of a 20-Mil PVC Geomembrane - Journal Of Vinyl & Additive Technology, December 2004, Vol. 10, No. 4 -Department of Civil & Environmental Engineering University of Illinois Urbana, IL 61801

E. J. NEWMAN and T. D. STARK (2009). Ten-year PVC geomembrane durability - Geosynthetics International 16, No. 2

FILHO, R.B. & MATTOSO, L.H.C (2003) – Estudo de polímeros por Microscopia de Força Atômica – Comunicado 53 Técnico – ISSN 1517-4786, São Carlos, SP

FILHO, R.B.; ASSIS, O.B.G & PESSOA; J.D.C (1998) – Relação entre parâmetros de rugosidade obtidos por microscopia de força atômica e por microscopia eletrônica por varredura. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, Vol. 17, nº 2

GOLDSTEIN J.I.; NEWBURY D. E.; ECHIL P; JOY DC; ROMIG JR AD; LYMAN CE; FIORI C; LIFSHIN E. (1992). Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. New York: Plenum Press; 1992.

GRAY, R.L., (1990). Accelerated testing methods for evaluating polyolefin stability. In: Koerner, R.M. (Ed.), Geosynthetics Testing for Waste Containment Applications, ASTM STP 1081. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

GRI-GM13 (2012). Test Methods, Test Properties, Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes.

HERRMANN P. S.P.; SILVA M.A. P; BERNARDES R.F; et al (1997) – Microscopia de Varredura por Força: uma Ferramenta Poderosa no Estudo de Polímeros. Polímeros: Ciência e Tecnologia

JENNINGS, T. C. & STARNES JR., W. H. (2005). “PVC stabilizers and lubricants”, in: PVC handbook, C. E. Wilkes, J. W. Summers & C. A. Daniels (ed.), Hanser Gardner Publishers, Cincinnati.

K. GAMSKI (1984). Geotextiles and Geomembranes 0266-1144/84 - Elsevier Applied Science Publishers Ltd, England, 1984. Printed in Great Britain.

KOERNER, R.M.(2005). Test Standarts and their Classification, pp. 4, RILEM Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes -Geomembranes : Identification and Performance Testing – Rollin, A.L.&Rigo,J.M.,eds., Chapmanand Hall, Cambridge, Great Britain.

KOERNER, R.M., LORD, A.E., HSUAN, Y.H., (1992). Arrhenius modelling to predict geosynthetics degradation. Geotextiles and Geomembranes 11, 151–183.

KOERNER,R.,HALSE,Y.H and LORDJR,A.E.(1990). Long-Term Durabilitys and Ageing of Geomembranes. ASCE–Geotechnical Special Publication. Waste Containment System Construction, Regulation and Performance. Edited by Rudolph Bonarpare.No.26,pp. 106-134.

KORNER, R.M. (2005). Designing with geosynthetics, 5th, Ed. Pearson Prentice Hall, Englewood Cliffs.

LOBATO, L.M. & L. C; Vieira, L.W.R.,(2001). Brazil’s premier province. Part II : geology, and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. Mineralium Deposita, 36: 249-277.

LODI, P.C & BUENO, B.S (2012) - Thermo-gravimetric Analysis (TGA) after Different Exposures of High Density Polyethylene (HDPE) and Poly Vinyl Chloride (PVC) Geomembranes – EJGE Vol. 17 [2012], Bund. W - Lodi et al.

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

LOPES, M. P. E LOPES, M. D. L. (2010). A Durabilidade dos Geossintéticos. FEUP Edições. ISBN 978-972-752-120-3

- LUCAS EF., SOARES BG., MONTEIRO EE (2001). Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica, 1º edição, E-papers Serviços Editoriais Ltda.
- MANO, E. B.(1991). Polímeros como materiais de engenharia. Edição 2. São Paulo – SP: Edgard Blucher Ltda. 1991. P. 193.
- MANO, E.B. e MENDES, L.C (1999). Introdução a polímeros. 2a ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher.
- MATHEUS, EVALDO (2002). Efeitos do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintéticos. Tese de Doutorado-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 284 p.
- MAISONNEUVE, C., PIERSON, P., DUQUENNOI, C., MORIN, A., (1998) - Assessing the long term behavior of geomembranes in multi-factor environments - Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol.1, Atlanta, March. Industrial Fabric Association International, St Paul, N, USA, pp.355–358.
- N. TOUZE-FOLTZ; M. AHARI; M. MENDES; C. BARRAL; M. GARDONI; AND L. MAZÉAS (2012) - Diffusion of Phenolic Compounds through an HDPE Geomembrane - Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 43 No3 September 2012 ISSN 0046-5828
- NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. (1987). Development of an ultra-high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. Scanning Microscopy. v.11, 901-909, 1987.
- NASCIMENTO, M. T. (2002). Avaliação de Dano Mecânico em Geossintéticos em Obras de Disposição de Resíduos. Tese de Mestrado, Publicação G. DM – 092A/02 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF 105 p.
- NORTENE (2013) - Apresentação sobre processos de fabricação matriz plana e balão - www.engepol.com
- NUNES, L. R (2006). Concepção e org.; Rodolfo Jr., Antonio, coord. Tecnologia do PVC / Antonio Rodolfo Jr., Luciano Rodrigues Nunes, Wagner Ormanji; consultoria e revisão técnica: Elias Hage Jr., José Augusto Marcondes Agnelli, Luiz Antonio Pessan. São Paulo: Pro Editores / Braskem, 2002. 2ª edição revista e ampliada.
- OZSU, E. & ACAR Y.B. (1992) – Liquid Conduction Tests for Geomembranes - Geotextiles and Geomembranes, vol. 11, pp. 291 a 318, Elsevier Science Publishers Ltd, 1992.
- PALMEIRA, E. M. (1992). Geossintéticos: Tipos e Evolução nos Últimos Anos. Seminário Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia, GEOSSINTÉTICOS'92,UnB, Brasília, DF, pp 1-20.
- PIMENTA DE AVILA CONSULTORIA (2013). Mineração Fazenda Brasileiro - Sistema de Disposição de Rejeitos Volume II - manual de operação

R.E. LANDRETH (1990). Service life of geosynthetics in hazardous waste management facilities, in: I.D. Peggs (Ed.), *Geosynthetics; Microstructure and Performance*, ASTM STP, Vol. 1076, ASTM, Philadelphia,

RIGO, J.M & CAZZUFFI,D.A.(2005). Test Standarts and their Classification, pp. 22 – 58, RILEM Report of Technical Committee 103 – MGH – Mechanical and Hidraulic Testing of Geomembranes - Geomembranes : Identification and Performance Testing – Rollin, A.L.&Rigo,J.M.,eds., Chapman and Hall, Cambridge, Great Britain

RODOLFO JR., A.; MEI, L. H. I. (2007). Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC - Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, nº 3, p. 263-275, 2007

ROWE, R.K & SANGAM,H.P.(2002). Durability of HDPE geomembranes, Review Article, *Geotextiles and Geomembranes* 20, 77–95, Elsevier Science Publishers Ltd, 2002.

R. KERRY ROWE, F.ASCE ; M. Z. ISLAM ; AND Y. G. HSUAN (2010). Effects of Thickness on the Aging of HDPE Geomembranes - *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 2, February 1, 2010.

SAMPAIO, SORAYA SALATIEL (2013) – Estudo do comportamento de barreiras poliméricas em sistemas de disposição de rejeito de minério de ouro, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

SANDRONI, S.S., DE MELLO, L.G.,GOMES, R.C. & VILAR, O. M. (2010). Brazilian research and practice with geosynthetics. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for a Challenging world. E.M. Palmeira-D. M. Vidal- A. S. J. F. Sayão- M. Ehrlich, Guarujá, Brazil, 1:3-41.

SANGAM H. P. & ROWE R.K (2001). Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (HDPE) geomembranes - *Can. Geotech. J.* 39: 1221–1230

SHARMA, H.D. and LEWIS, S.P. (1994). *Waste containment System, waste stabilization and landfills: design and evaluation*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

SURMANN, R., PIERSON, P., COTTOUR, P. (1995) - Geomembrane Liner Performance and Long Term Durability, Proceedings Sardina 95, Fifth International Landfill Symposium, Italy, 1995, pp. 405-414.

VAN SANTVOORT GPTM (1995). *Geosynthetics in civil engineering*, editor. Rotterdam: AA Balkema Publishers. p. 153-170.

VAN ZANTEN, R.V. (1986) – *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering* - A.A. Balkema - Rotterdam - Netherlands.

VILAR, O.M (2004). Geossintéticos em aplicações ambientais - Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.4, p.69-85, Abril, 2004.

WAN, E.; GALEMBECK, E. e GALEMBECK F. (2001). Polímeros sintéticos. Em: De Paoli, M.A. e Maldaner, O.A. (Eds.) *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola (Novos Materiais)*, n. 2, p. 5-8

YAMAKI, S.B.; PEDROSO, A.G. e ATVARS, T.D.Z. (2002). O estado vítreo dentro da perspectiva do curso de graduação em Química (Físico-Química). *Química Nova*, v. 25, p. 330-334

YAMANA GOLD (2014). Operação e produção Mina Fazenda Brasileiro: Disponível em <http://www.yamana.com/Operations/ProducingMinesFazendaBrasileiro/default.aspx> - Acesso em 26 de abril de 2014.

APÊNDICE A

RESULTADOS OBTIDOS PARA AS PROPRIEDADES FÍSICAS

Tabela A.1 - Resultados dos ensaios das propriedades físicas das amostras virgens de HDPE e PVC

Amostra	Nº	Espessura (mm)	Peso (g)	Densidade
GMV-A	1	1,67	23,95	0,940
	2	1,65	23,42	0,943
	3	1,65	23,10	0,938
	4	1,65	23,34	0,943
	5	1,62	23,32	0,937
	6	1,60	23,08	0,940
GMV-B	7	0,82	16,54	1,318
	8	0,81	16,44	1,333
	9	0,81	16,39	1,339
	10	0,83	16,57	1,333
	11	0,81	16,35	1,323
	12	0,82	16,35	1,333
GMV-C	13	0,86	17,12	1,364
	14	0,83	16,45	1,376
	15	0,85	16,93	1,369
	16	0,85	16,71	1,357
	17	0,85	16,77	1,364
	18	0,86	16,96	1,369
GMV-D	19	0,84	15,10	1,215
	20	0,83	14,95	1,217
	21	0,83	14,95	1,209
	22	0,84	15,08	1,206
	23	0,82	14,85	1,209
	24	0,83	14,95	1,217

Tabela A.2 - Resultados dos ensaios de propriedades físicas das amostras exumadas de HDPE e PVC

Amostra	Nº	Espessura (mm)	Peso (g)	Densidade
GMEX-A1	1	1,65	23,77	0,912
	2	1,67	23,45	0,914
	3	1,62	23,11	0,934
	4	1,62	22,85	0,926
	5	1,63	23,28	0,917
	6	1,72	23,25	0,917
GMEX-A2	7	1,83	24,44	0,941
	8	1,71	24,44	0,938
	9	1,83	24,97	0,946
	10	1,78	25,04	0,943
	11	1,75	24,79	0,942
	12	1,66	24,25	0,934
GMEX-A3	13	1,61	23,02	0,945
	14	1,73	22,92	0,945
	15	1,67	22,89	0,949
	16	1,77	23,33	0,946
	17	1,75	22,90	0,934
	18	1,67	22,23	0,942
GMEX-B	19	0,77	14,98	1,418
	20	0,77	14,22	1,387
	21	0,78	15,11	1,386
	22	0,77	14,63	1,387
	23	0,79	15,03	1,411
	24	0,77	14,97	1,411
GMEX-C	25	0,80	14,56	1,366
	26	0,81	14,57	1,391
	27	0,79	14,40	1,382
	28	0,79	14,18	1,406
	29	0,79	14,17	1,380
	30	0,80	14,48	1,382
GMEX-D	31	0,65	13,08	1,478
	32	0,67	13,45	1,458
	33	0,71	13,67	1,440
	34	0,70	13,47	1,479
	35	0,70	13,40	1,469
	36	0,71	13,80	1,465

Tabela A.3 - Resultados dos ensaios de propriedades físicas das amostras envelhecidas no processo simultâneo para HDPE

Amostra	Nº	Espessura mm	Peso g	Densidade	Espessura mm	Peso g	Densidade	Retirada dias	Recipiente	
GMD-A	1	1,64	23,26	0,942	1,73	23,27	0,945	30	I	
	2	1,50	21,40	0,953	1,54	21,41	0,947			
	3	1,69	22,90	0,945	1,66	22,90	0,950			
	4	1,47	20,91	0,957	1,45	20,91	0,952			
	5	1,75	23,94	0,954	1,80	23,94	0,952			
	6	1,74	23,68	0,951	1,70	23,68	0,958			
	7	1,49	21,20	0,953	1,50	21,20	0,953	60	II	
	8	1,48	23,19	0,949	1,50	23,19	0,951			
	9	1,46	20,82	0,948	1,51	20,82	0,948			
	10	1,49	21,25	0,945	1,49	21,25	0,951	120		
	11	1,47	21,11	0,945	1,47	21,11	0,946	180		
	12	1,49	21,16	0,949	1,48	21,18	0,946			
	13	1,49	21,21	0,949	1,49	21,22	0,951			
	14	1,54	22,03	0,947	1,54	22,03	0,948	60		III
	15	1,47	21,24	0,949	1,47	21,24	0,953			
	16	1,47	20,96	0,948	1,47	20,96	0,948			
	17	1,47	21,07	0,949	1,46	21,06	0,948	120		
	18	1,49	21,18	0,949	1,49	21,15	0,949	180		
	19	1,47	21,05	0,953	1,46	21,07	0,953			
	20	1,47	21,12	0,953	1,46	21,15	0,953			
	21	1,56	21,30	0,949	1,53	21,34	0,953	60	IV	
	22	1,75	23,28	0,957	1,71	23,31	0,947			
	23	1,45	20,95	0,953	1,44	20,98	0,953			
	24	1,58	22,26	0,947	1,56	22,27	0,951			
GMD-B	25	0,78	16,45	1,354	0,77	16,53	1,374	30	IV	
	26	0,79	16,59	1,351	0,78	16,70	1,358			
	27	0,80	16,72	1,341	0,79	16,81	1,349			
	28	0,83	16,29	1,354	0,83	16,34	1,369			
	29	0,86	16,58	1,359	0,85	16,69	1,380			
	30	0,81	16,49	1,370	0,80	16,59	1,328			
	31	0,79	16,60	1,381	0,758	16,60	1,383	60	V	
	32	0,81	16,52	1,370	0,778	16,52	1,375			
	33	0,80	16,54	1,378	0,80	16,43	1,354			
	34	0,78	16,53	1,359	0,81	16,38	1,354	120		
	35	0,80	16,58	1,381	0,79	16,47	1,365	180		
	36	0,81	16,51	1,381	0,789	16,48	1,364	60		VI
	37	0,80	16,52	1,392	0,789	16,47	1,359			
	38	0,82	16,49	1,359	0,81	16,34	1,365			
	39	0,79	16,58	1,367	0,82	16,42	1,362	120		
	40	0,77	16,53	1,381	0,78	16,48	1,362	180		
	41	0,80	16,36	1,365	0,78	16,29	1,344			
	42	0,79	16,54	1,381	0,79	16,52	1,352			
	43	0,80	16,52	1,381	0,800	16,47	1,388	60	VII	
	44	0,80	16,45	1,370	0,800	16,40	1,378			
	45	0,79	16,47	1,376	0,81	16,36	1,365			
	46	0,81	16,48	1,386	0,82	16,35	1,365	120		
	47	0,81	16,39	1,362	0,78	16,32	1,354	180		
	48	0,79	16,64	1,354	0,78	16,60	1,359			

Amostra	Nº	Espessura mm	Peso g	Densidade	Espessura mm	Peso g	Densidade	Retirada dias	Recipiente	
GMD-C	49	0,80	17,02	1,550	0,77	17,04	1,404	30	VIII	
	50	0,81	16,57	1,403	0,72	16,61	1,383			
	51	0,83	15,97	1,380	0,82	16,02	1,403			
	52	0,82	16,92	1,402	0,81	16,88	1,397			
	53	0,83	16,90	1,380	0,82	16,91	1,396			
	54	0,80	16,72	1,375	0,78	16,78	1,401			
	55	0,83	16,87	1,391	0,81	16,48	1,455	60	IX	
	56	0,83	16,84	1,405	0,81	16,70	1,440			
	57	0,83	16,75	1,408	0,83	16,04	1,408	120		
	58	0,82	16,83	1,397	0,83	16,06	1,436			
	59	0,82	16,93	1,402	0,85	16,25	1,390	180		
	60	0,81	16,43	1,387	0,82	15,79	1,410			
	61	0,83	16,73	1,375	0,83	16,12	1,397	60		
	62	0,81	16,78	1,397	0,83	16,10	1,405			
	63	0,82	16,73	1,400	0,81	16,36	1,440	120		X
	64	0,81	16,74	1,408	0,81	16,37	1,440			
	65	0,83	16,71	1,375	0,83	16,00	1,400	180		
	66	0,79	16,92	1,388	0,81	15,25	1,383			
	67	0,78	15,79	1,392	0,81	15,03	1,402	60		
	68	0,78	15,98	1,377	0,79	15,39	1,412			
69	0,79	15,76	1,375	0,78	15,02	1,414	180			
70	0,81	16,87	1,391	0,80	16,37	1,466				
71	0,83	16,67	1,408	0,80	16,18	1,447	60	XI		
72	0,83	16,73	1,397	0,83	15,96	1,427				
GMD-D	73	0,79	15,03	1,206	0,75	14,96	1,230	30	XI	
	74	0,78	14,95	1,198	0,75	14,88	1,232			
	75	0,78	15,12	1,196	0,76	15,05	1,229			
	76	0,79	15,04	1,206	0,75	15,00	1,230			
	77	0,78	14,99	1,207	0,76	14,90	1,231			
	78	0,80	15,21	1,195	0,76	15,10	1,208			
	79	0,80	15,21	1,201	0,79	14,99	1,245	60	XII	
	80	0,79	15,21	1,195	0,78	14,95	1,251			
	81	0,79	15,25	1,224	0,80	14,83	1,240	120		
	82	0,79	15,07	1,204	0,76	14,49	1,224	180		
	83	0,79	15,13	1,206	0,76	14,50	1,226			
	84	0,79	15,15	1,195	0,75	15,00	1,220	60		XIII
	85	0,79	15,10	1,223	0,79	14,93	1,231			
	86	0,80	15,26	1,201	0,79	14,72	1,242	120		
	87	0,78	14,84	1,190	0,78	14,32	1,230			
	88	0,78	14,96	1,206	0,78	14,51	1,236	180		
	89	0,79	14,97	1,207	0,77	14,12	1,233			
	90	0,79	15,02	1,215	0,77	14,17	1,233	60	XIV	
91	0,78	14,92	1,189	0,78	14,80	1,233				
92	0,79	15,11	1,213	0,78	14,95	1,225	120			
93	0,78	15,05	1,215	0,79	14,44	1,248				
94	0,79	15,07	1,215	0,79	14,60	1,234	180			
95	0,79	15,06	1,214	0,77	14,20	1,230				
96	0,77	15,01	1,196	0,77	14,26	1,230				

APÊNDICE B

RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS RESISTENCIA A TRAÇÃO PARA AS AMOSTRAS DE HDPE E PVC

Tabela B.1 - Resultados dos ensaios de resistência à tração das amostras intactas de HDPE e PVC

Propriedades										
			Escoamento				Ruptura			
	Amostra N°	e (mm)	F (N)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	F (N)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
GMV-A	1	1,67	3009	18,02	40,30	44,71	2460	14,73	566,92	2,60
	2	1,65	2975	18,03	40,30	44,74	2040	12,36	478,76	2,58
	4	1,65	2982	18,07	38,40	47,06	2460	14,91	225,83	6,60
	5	1,62	2934	18,11	40,50	44,72	2400	14,81	587,97	2,52
GMV-B	7	0,82	-	-	-	-	1432	17,5	346,5	5,04
	8	0,81	-	-	-	-	1286	15,9	288,2	5,51
	9	0,81	-	-	-	-	1436	17,7	360,5	4,92
	10	0,83	-	-	-	-	1510	18,2	390,4	4,66
	11	0,81	-	-	-	-	1395	17,2	348,9	4,94
GMV-C	13	0,86	-	-	-	-	1355	15,76	224,50	7,02
	14	0,83	-	-	-	-	1305	15,72	216,00	7,28
	15	0,85	-	-	-	-	1385	16,29	224,50	7,26
	16	0,85	-	-	-	-	1261	14,84	191,10	7,76
	17	0,85	-	-	-	-	1345	15,82	224,50	7,05
GMV-D	21	0,83	-	-	-	-	1296	15,61	388,00	4,02
	22	0,84	-	-	-	-	1280	15,24	381,70	3,99
	23	0,82	-	-	-	-	1301	15,87	396,60	4,00
	24	0,83	-	-	-	-	1262	15,20	372,10	4,09

Tabela B.2 - Resultados dos ensaios de resistência à tração das amostras exumadas de HDPE e PVC

Propriedades										
		Escoamento					Ruptura			
	Amostra N°	e (mm)	F (N)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	F (N)	σ (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)
GMEX-A1	1	1,65	3044	18,45	21,00	87,85	2630	15,94	480,47	3,32
	3	1,62	2990	18,46	21,90	84,28	2320	14,32	393,25	3,64
	4	1,62	2998	18,51	18,70	98,96	2200	13,58	282,75	4,80
	6	1,72	3054	17,76	20,40	87,04	2415	14,04	614,14	2,29
GMEX-A2	7	1,83	3600	19,67	18,60	105,76	2400	13,11	223,39	5,87
	8	1,71	3239	18,94	20,60	91,95	2300	13,45	400,33	3,36
	10	1,78	3294	18,51	22,00	84,12	2460	13,82	91,58	15,09
	11	1,75	3294	18,82	20,60	91,37	2460	14,06	196,50	7,15
GMEX-A3	13	1,61	3466	21,53	16,10	133,71	2440	15,16	89,55	16,92
	15	1,67	3467	20,76	15,40	134,81	2442	14,62	142,00	10,30
	16	1,77	3433	19,40	15,10	128,45	2354	13,30	63,54	20,93
	17	1,75	3400	19,43	14,90	130,39	2395	13,69	202,20	6,77
GMEX-B	19	0,77	-	-	-	-	1273	16,53	243,40	6,79
	20	0,77	-	-	-	-	1220	15,84	255,50	6,20
	21	0,78	-	-	-	-	1257	16,12	265,70	6,07
	22	0,77	-	-	-	-	1203	15,62	246,00	6,35
	23	0,79	-	-	-	-	1224	15,49	247,30	6,27
GMEX-C	25	0,8	-	-	-	-	1295	16,19	136,50	11,86
	26	0,81	-	-	-	-	1321	16,31	156,90	10,39
	27	0,79	-	-	-	-	1262	15,97	118,60	13,47
	28	0,79	-	-	-	-	1306	16,53	145,60	11,35
	29	0,79	-	-	-	-	1286	16,28	145,40	11,20
GMEX-D	31	0,65	-	-	-	-	1801	27,71	7,50	369,44
	32	0,67	-	-	-	-	1327	19,81	68,60	28,87
	33	0,71	-	-	-	-	1423	20,04	46,50	43,10
	34	0,7	-	-	-	-	2210	31,57	5,20	607,14
	35	0,7	-	-	-	-	1389	19,84	15,20	130,55

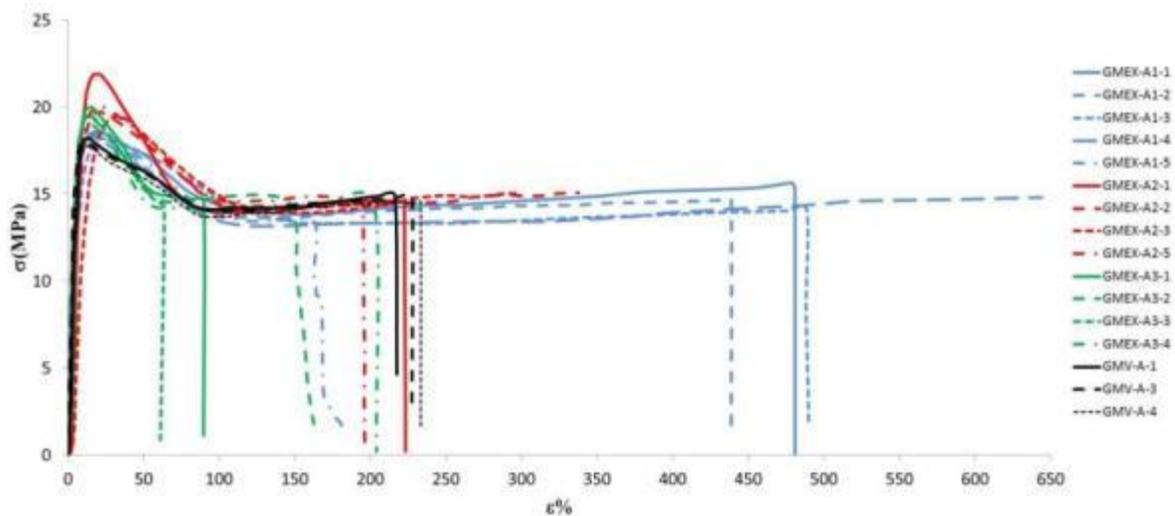


Figura B 1 – Resultados dos ensaios de tração das amostras exumadas e virgens – Fabricante A (HDPE)

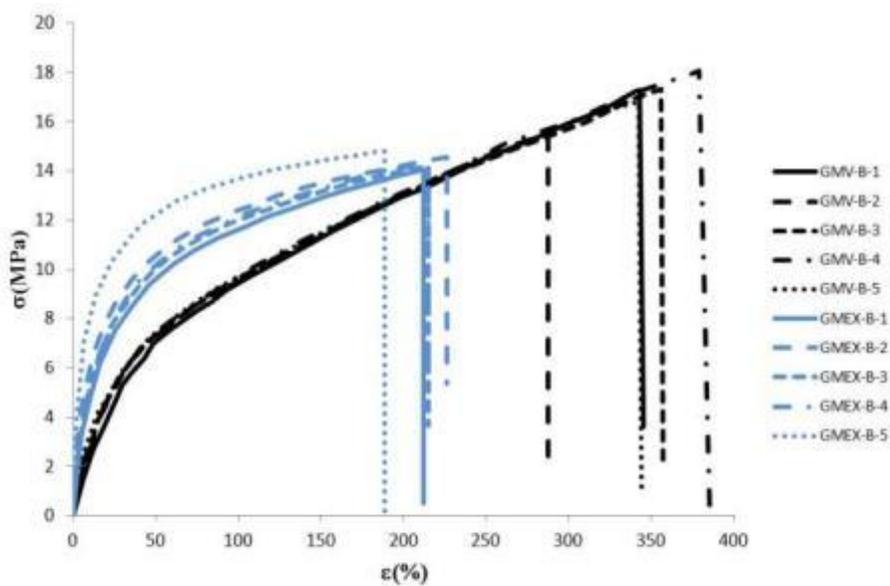


Figura B 2 - Curvas dos ensaios de tração das amostras exumadas e virgens – Fabricante B (PVC)

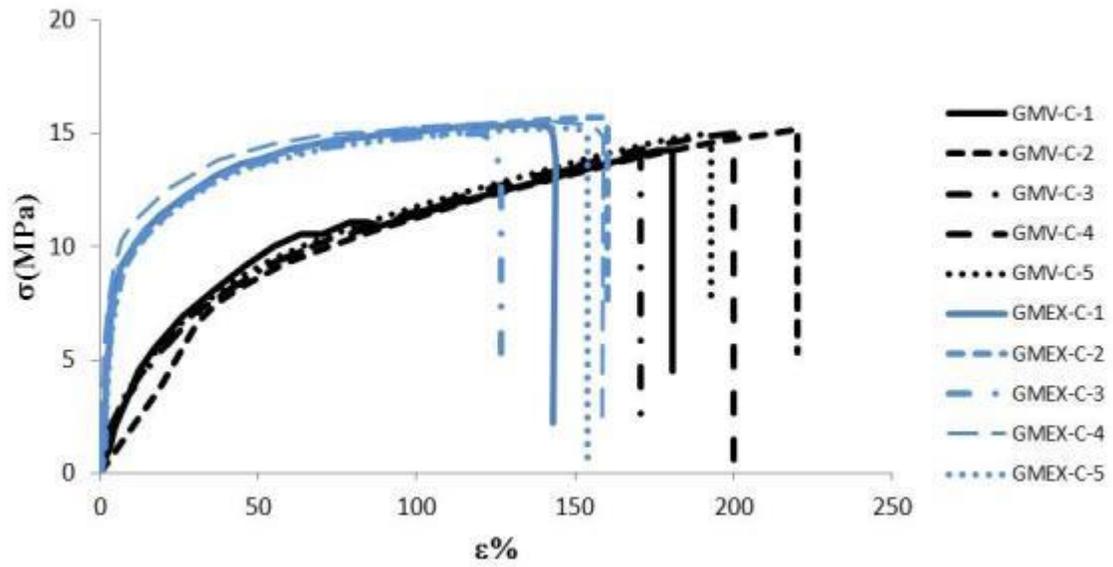


Figura B 3 - Curvas dos ensaios de tração das amostras exumadas e virgens – Fabricante C (PVC)

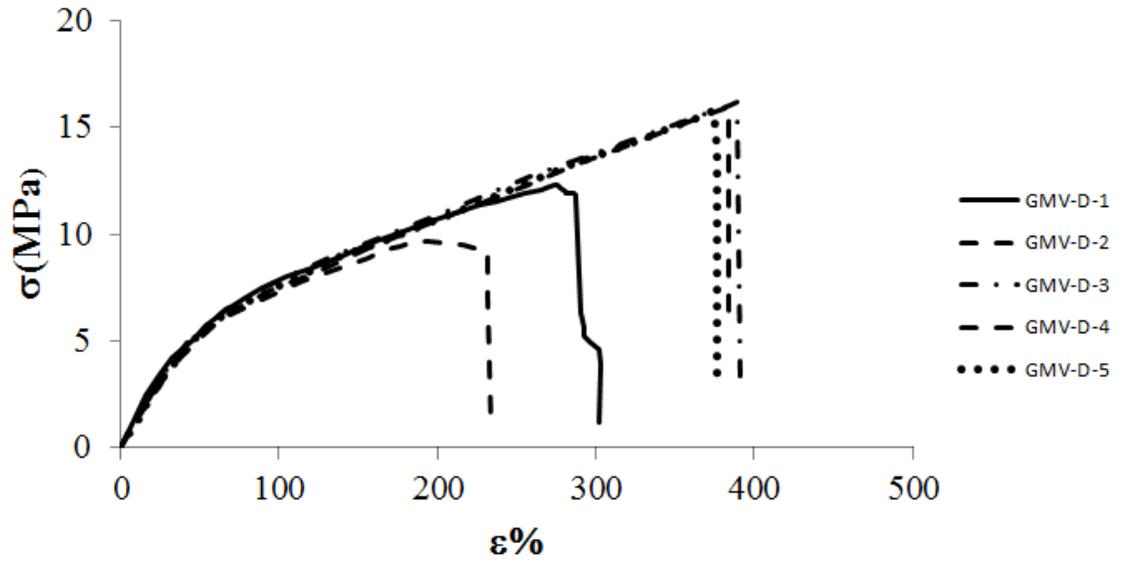


Figura B 4 - Curvas dos ensaios de tração das amostras exumadas e virgens – Fabricante D (PVC) – Não foi possível reproduzir as curvas das exumadas, devido à baixa deformabilidade apresentada.

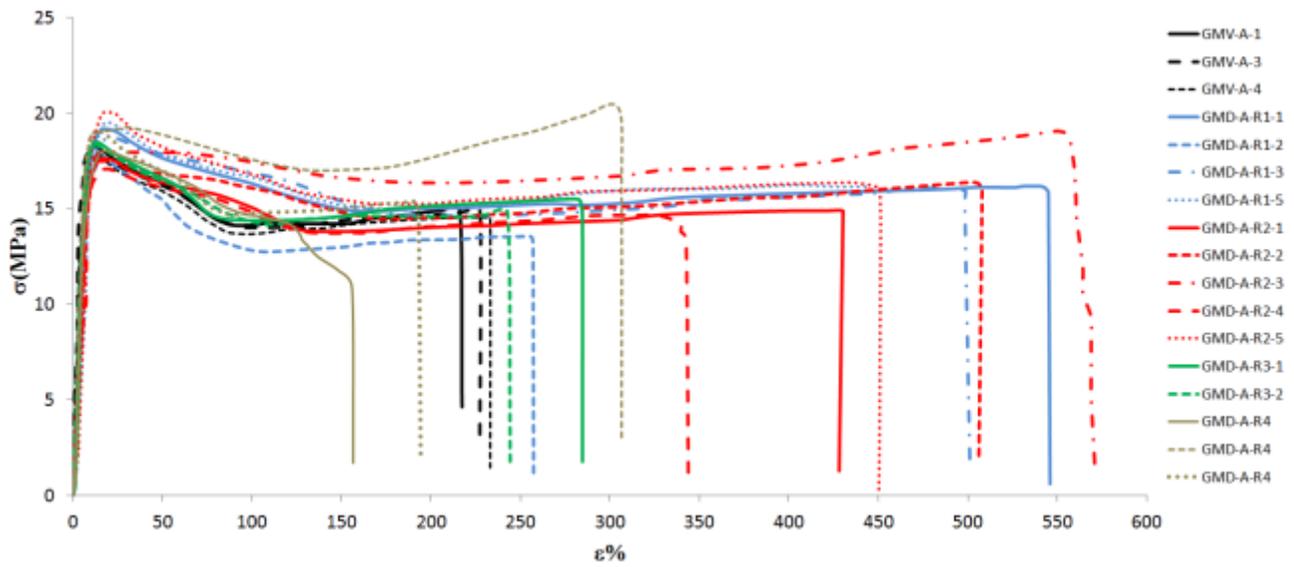


Figura B 5 - Curvas dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante A (HDPE)

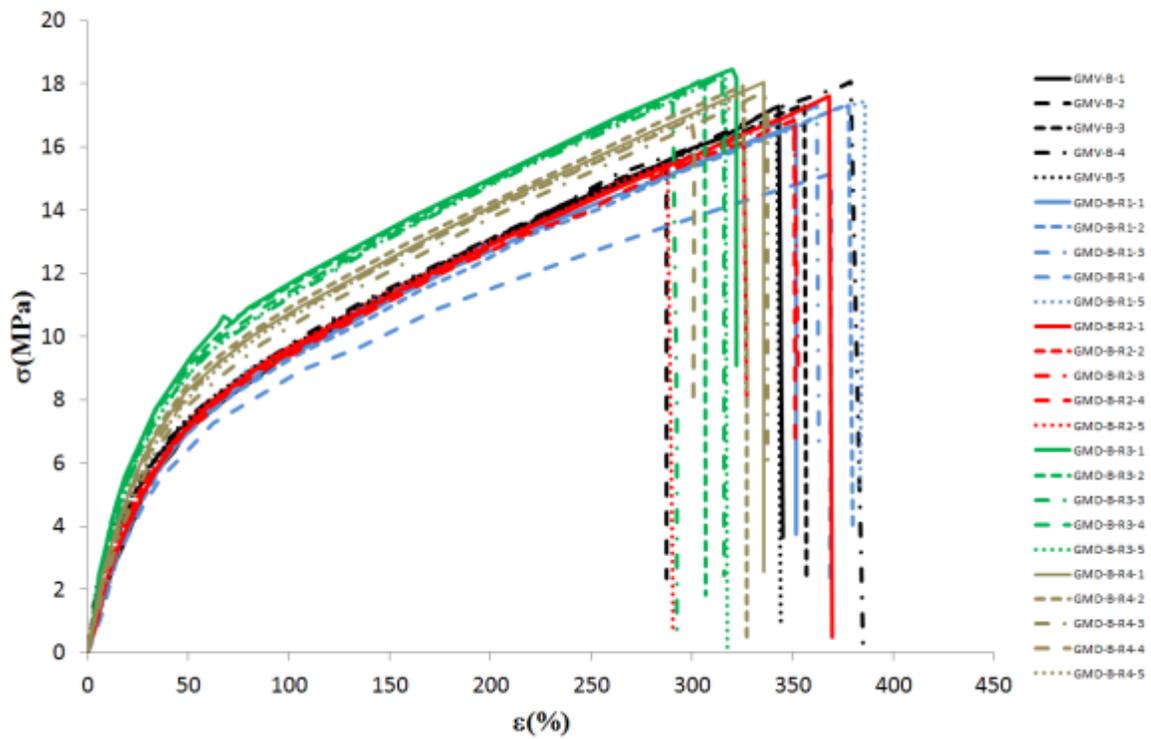


Figura B 6 - Curvas dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante B (PVC)

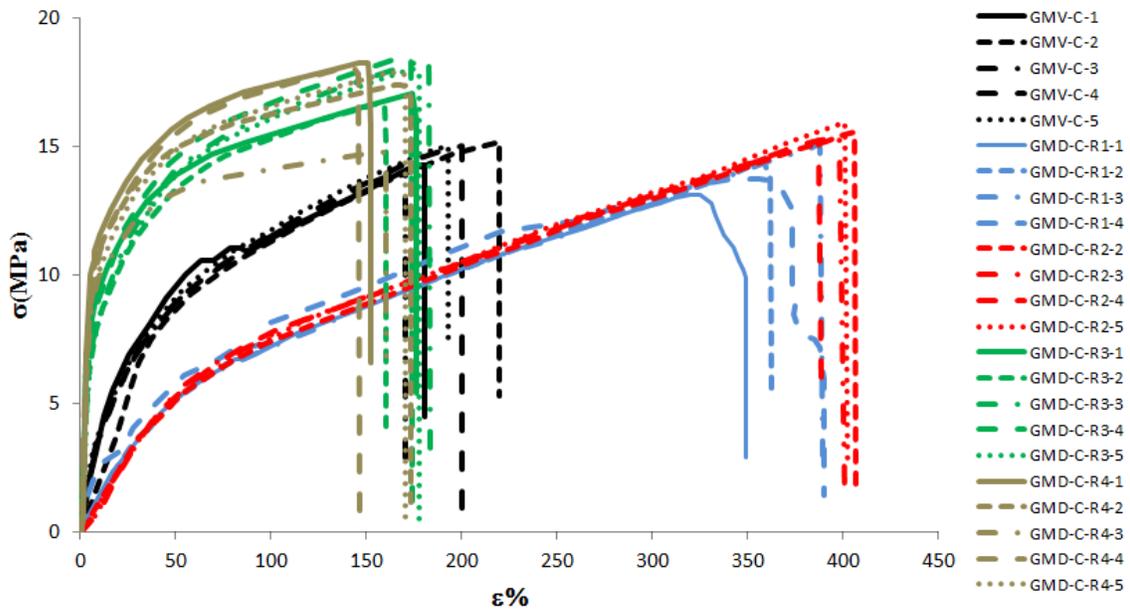


Figura B 7 - Curvas dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante C (PVC)

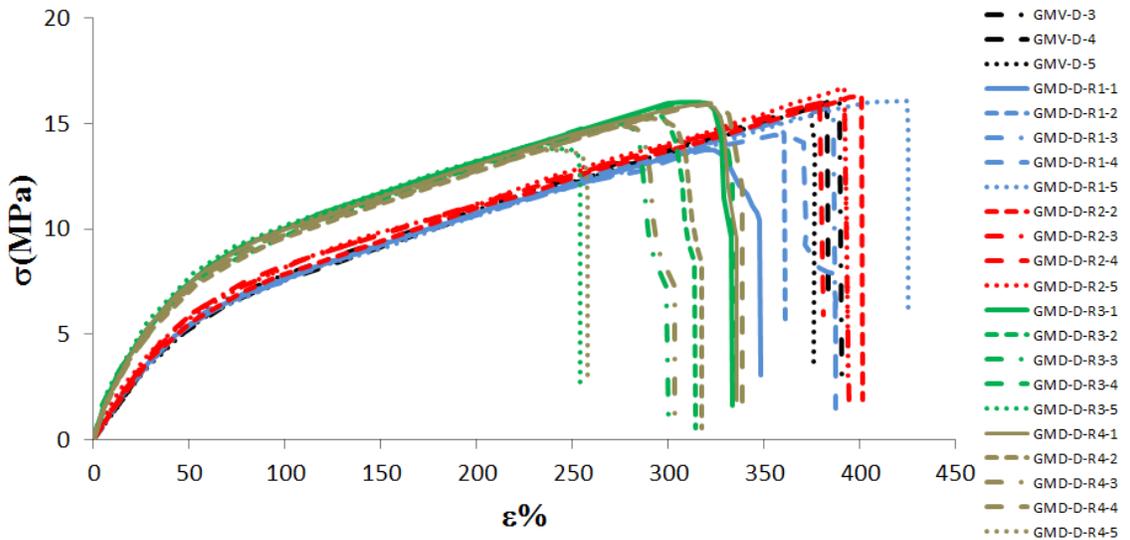


Figura B 8 - Curvas dos ensaios de tração do ensaio de durabilidade – Fabricante D (PVC)

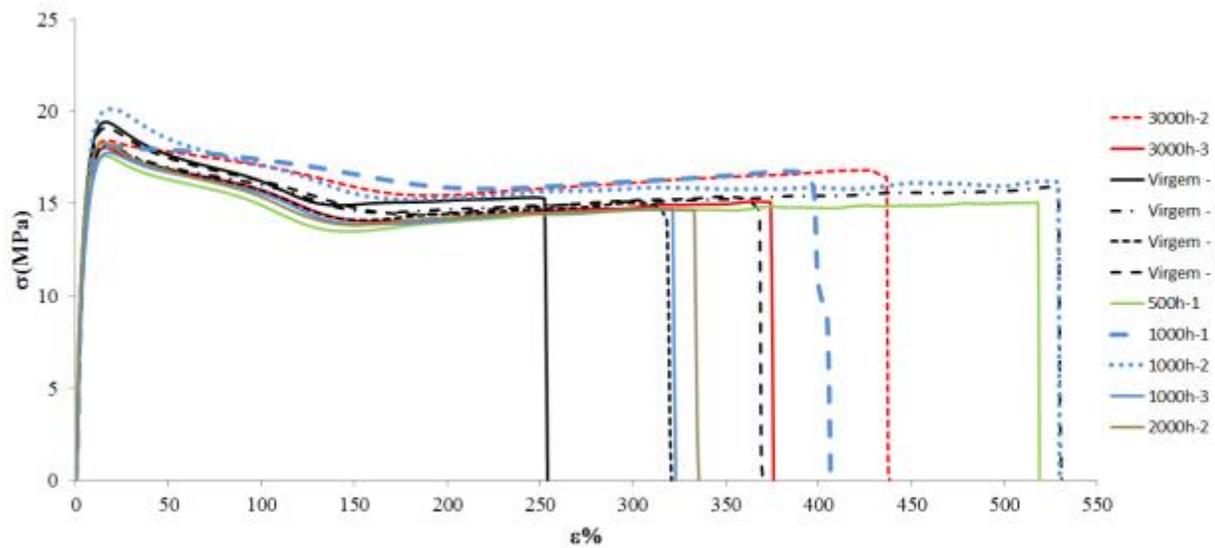


Figura B 9 - Curvas dos ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante A (HDPE)

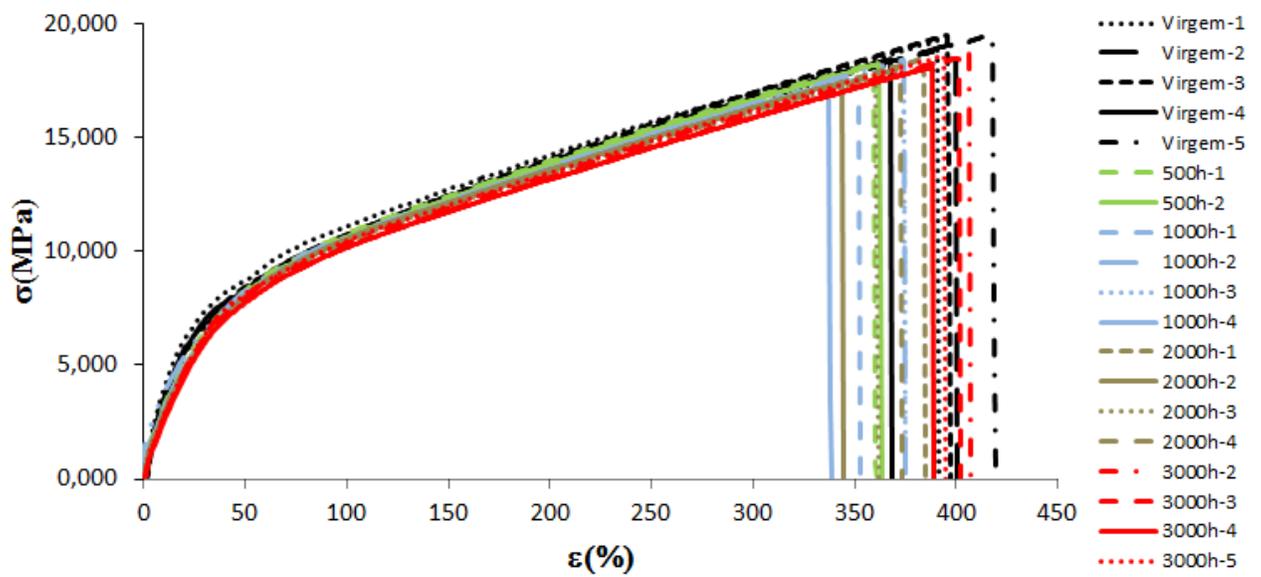


Figura B 10 - Curvas dos ensaios de tração do envelhecimento câmara úmida – Fabricante B (PVC)

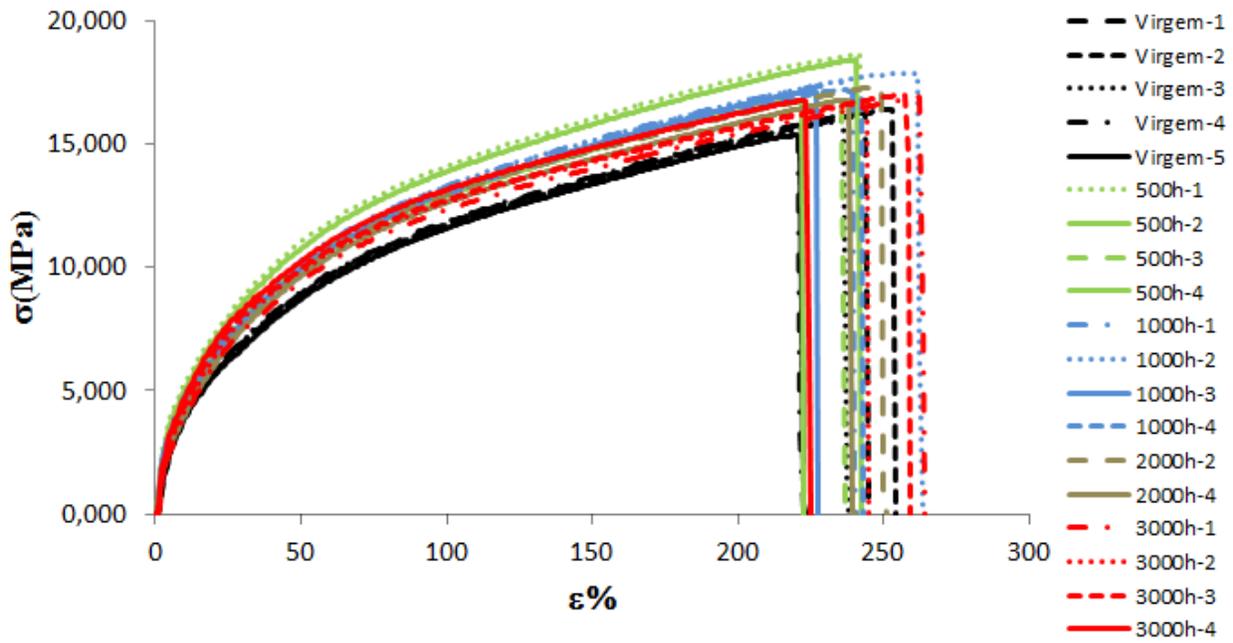


Figura B 11 - Curvas dos ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante C (PVC)

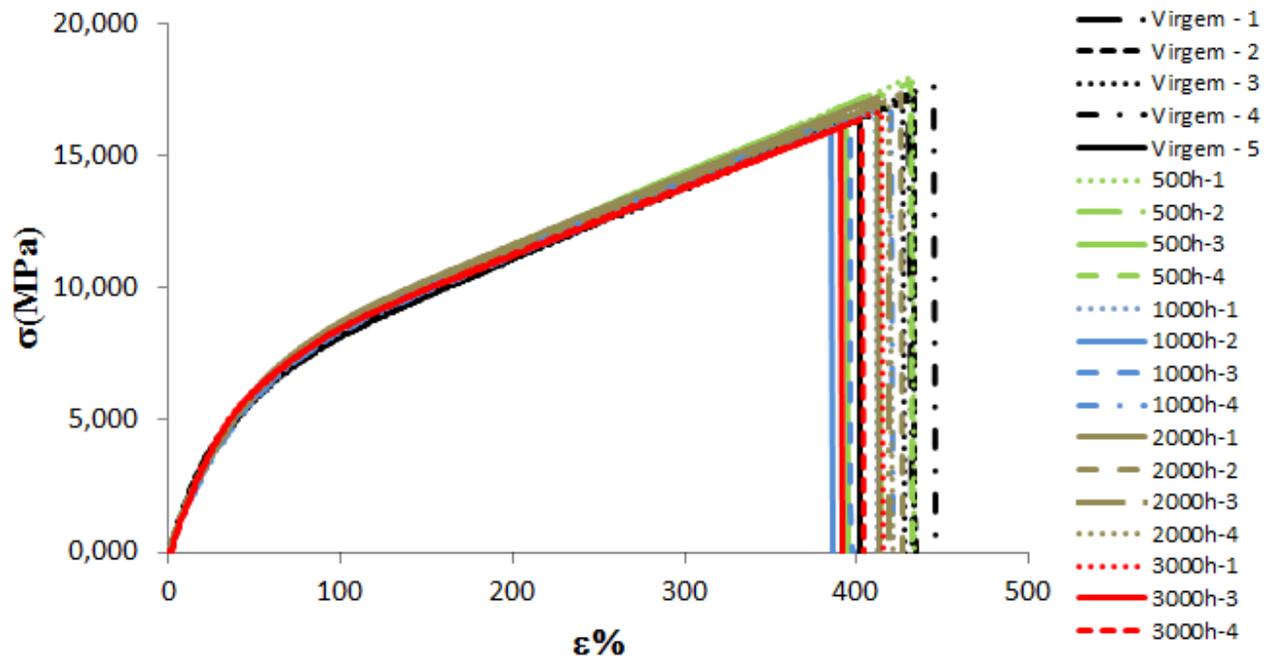


Figura B 12 - Curvas dos ensaios de tração do envelhecimento em câmara úmida – Fabricante D (PVC)

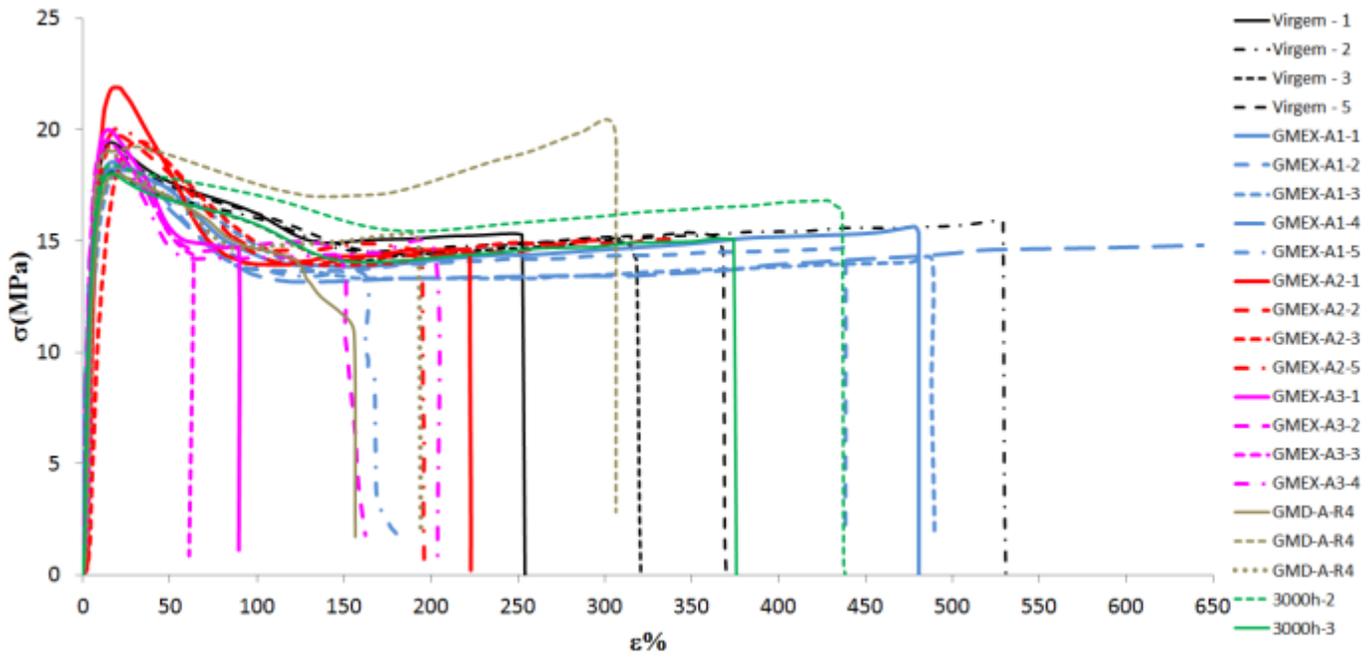


Figura B 13 - Comparativo das curvas dos ensaios de tração – Fabricante A (HDPE)

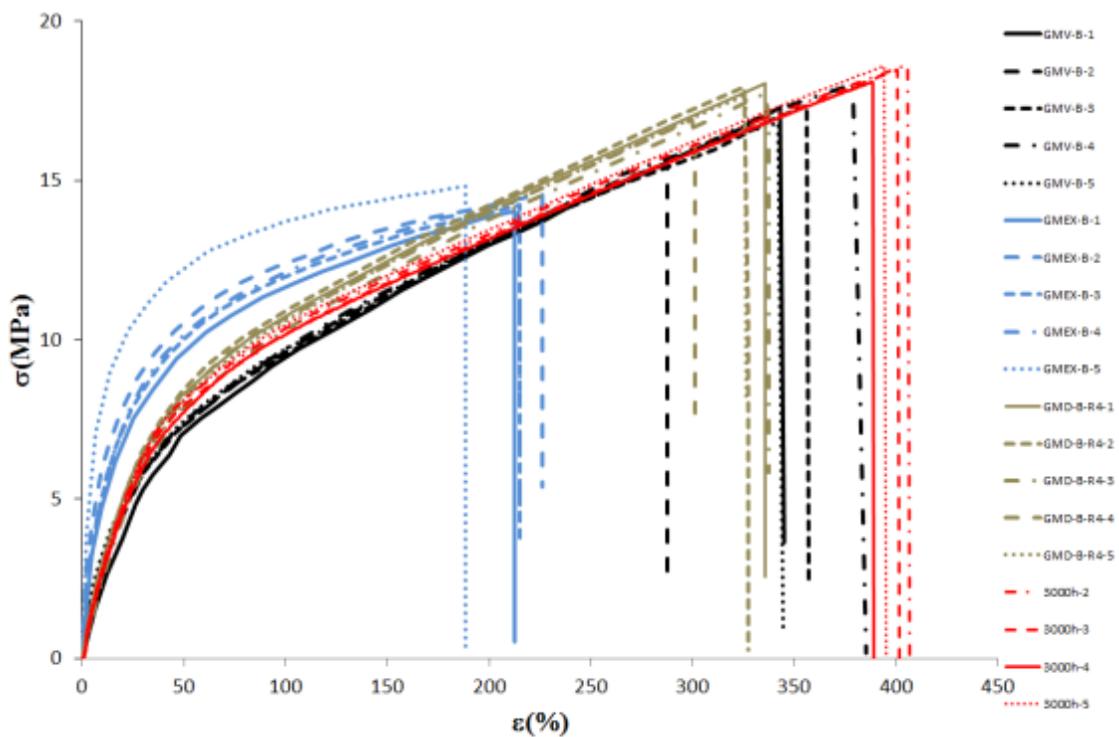


Figura B 14 - Comparativo das curvas dos ensaios de tração – Fabricante B (PVC)

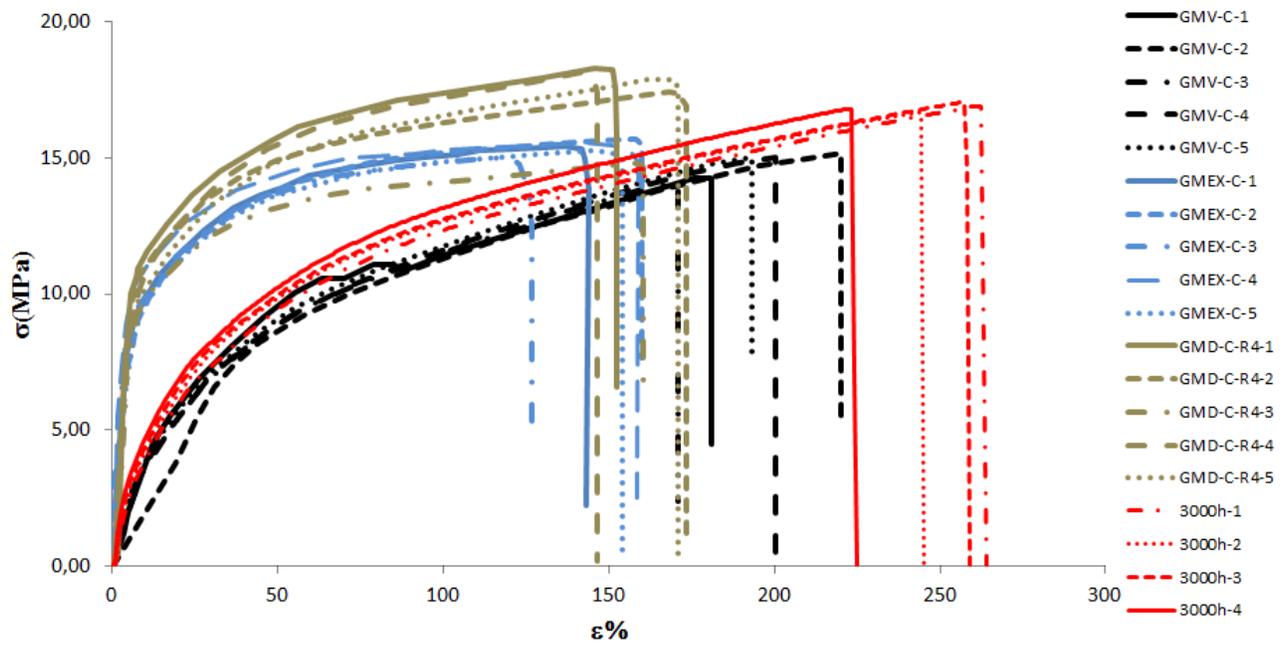


Figura B 15 - Comparativo das curvas dos ensaios de tração – Fabricante C (PVC)

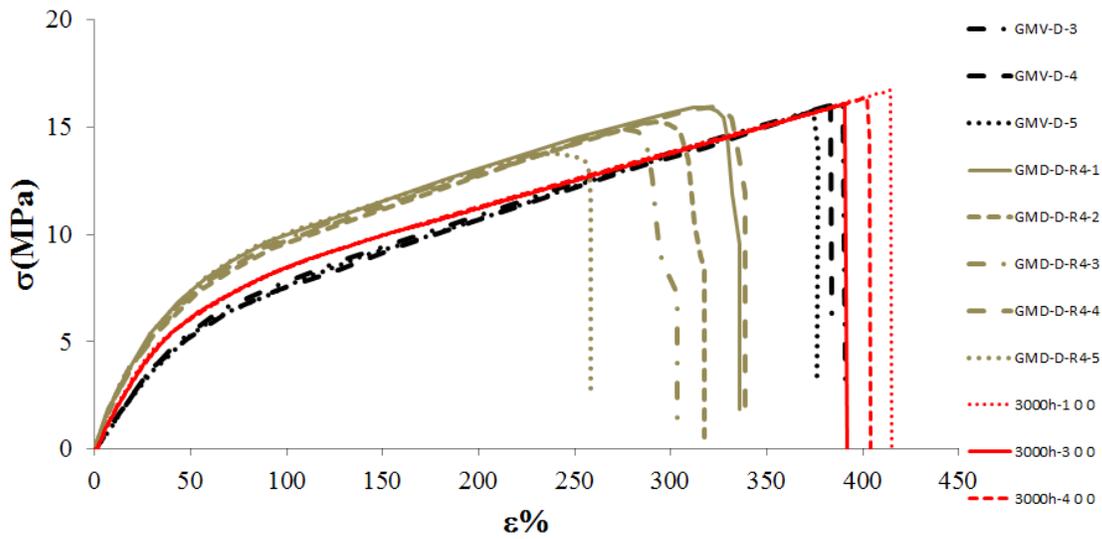


Figura B 16 - Comparativo das curvas dos ensaios de tração – Fabricante D (PVC)

APÊNDICE C

RESULTADOS OBTIDOS TERMOGRAVIMETRIA

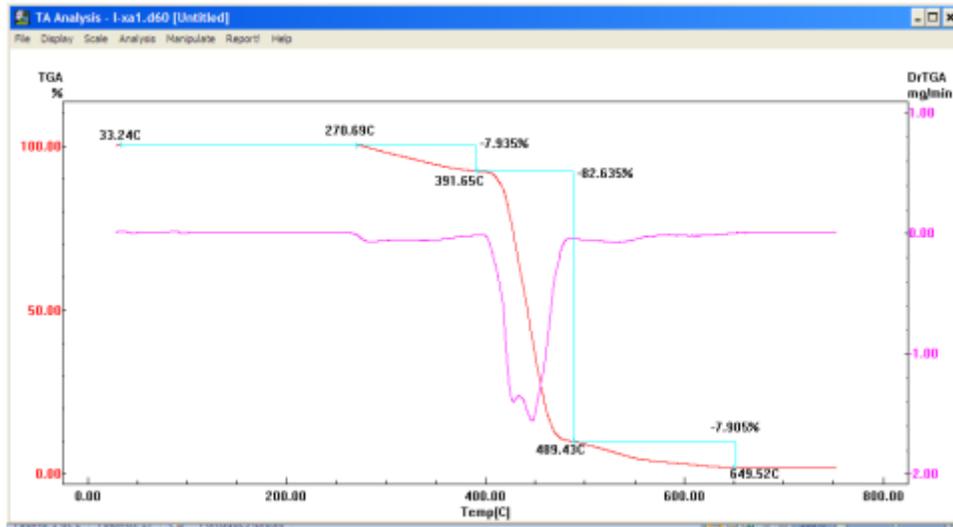


Figura C 17 – TGA amostra GMEX-A1

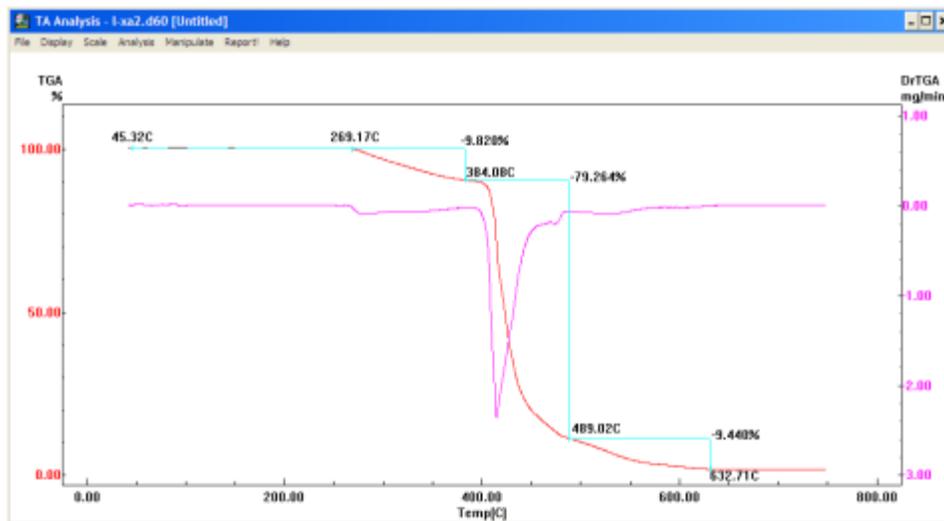


Figura C 18 – TGA amostra GMEX-A2

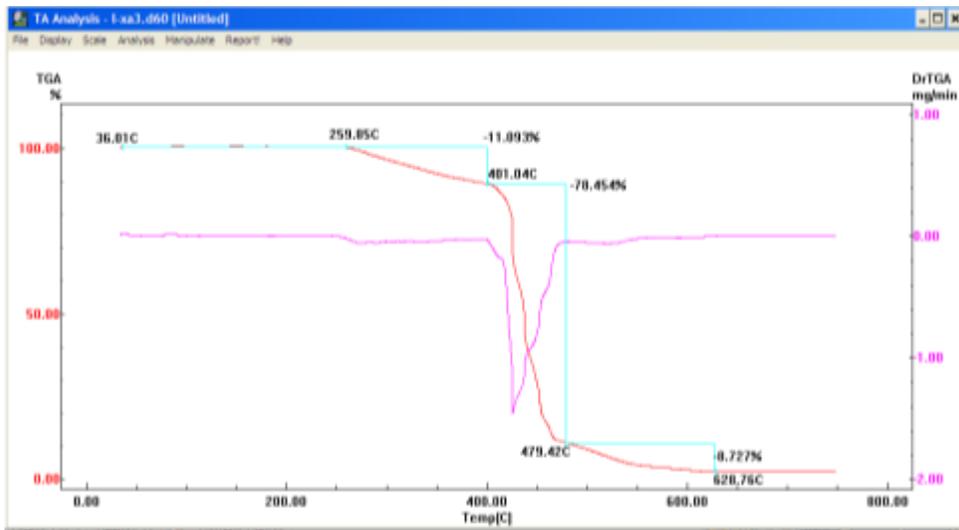


Figura C 19 – TGA amostra GMEX-A3

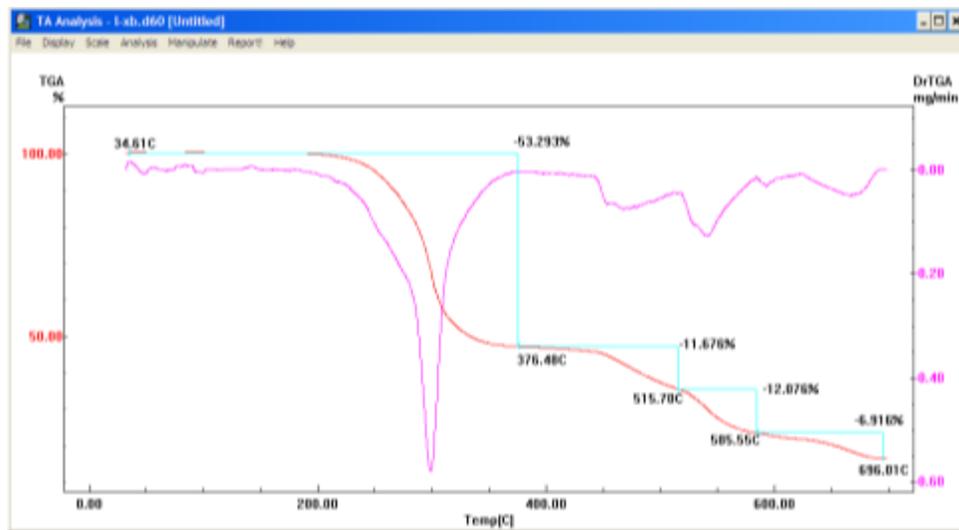


Figura C 20 – TGA amostra GMEX-B

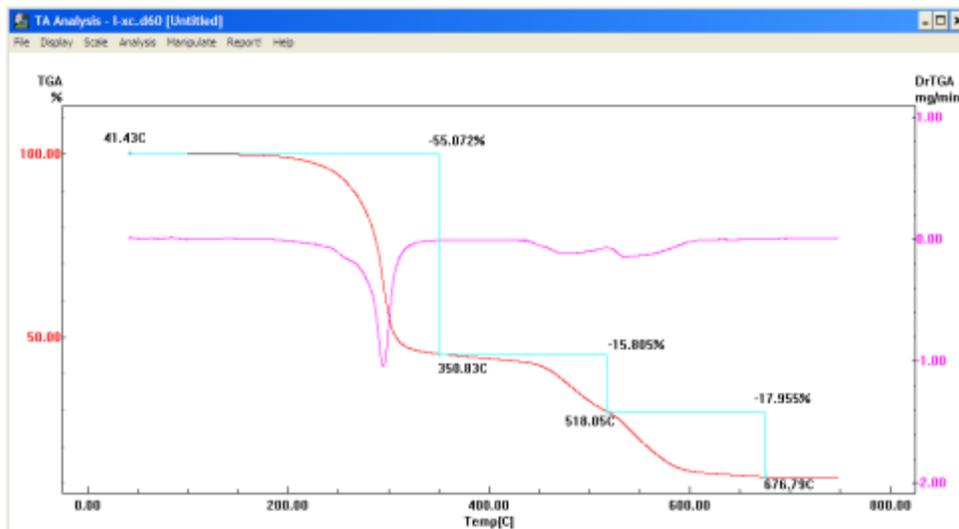


Figura C 21 – TGA amostra GMEX-C

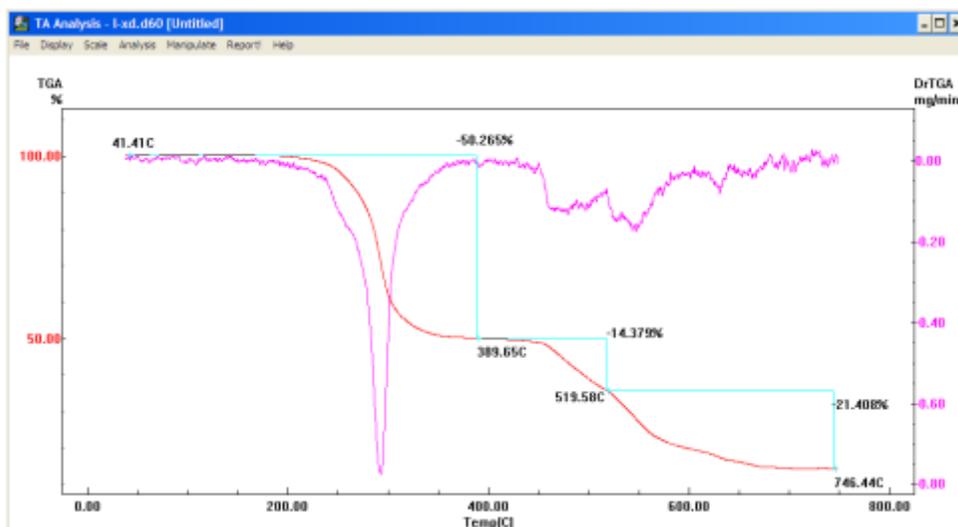


Figura C 22 – TGA amostra GMEX-D

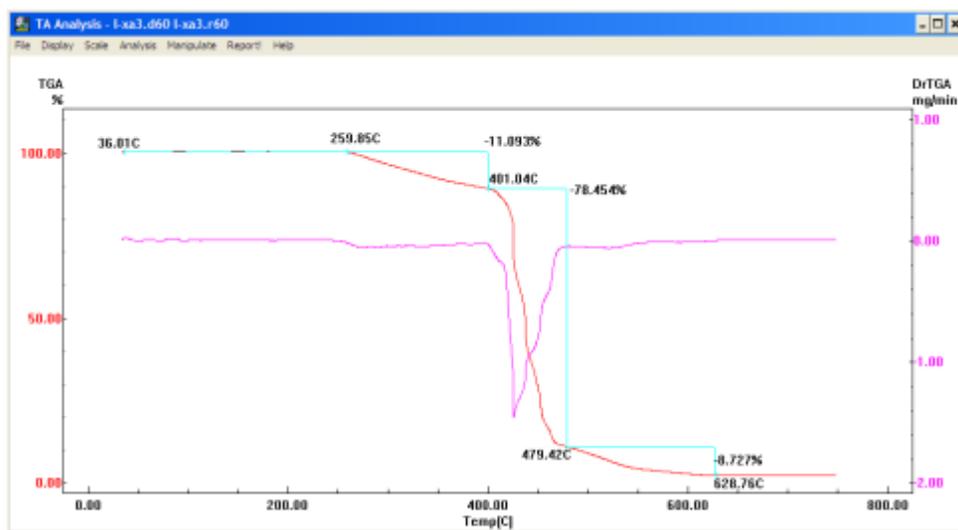


Figura C 23 – TGA amostra GMV-A

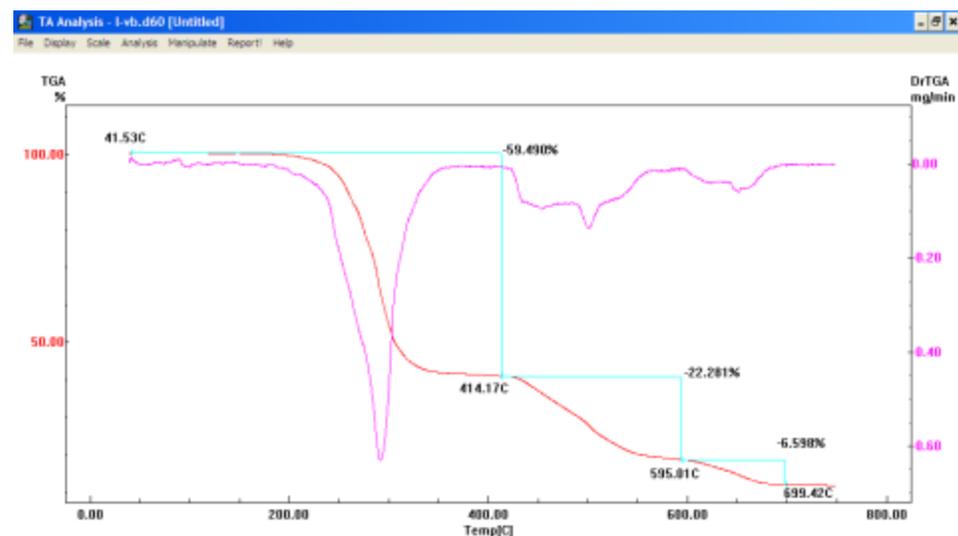


Figura C 24 – TGA amostra GMV-B

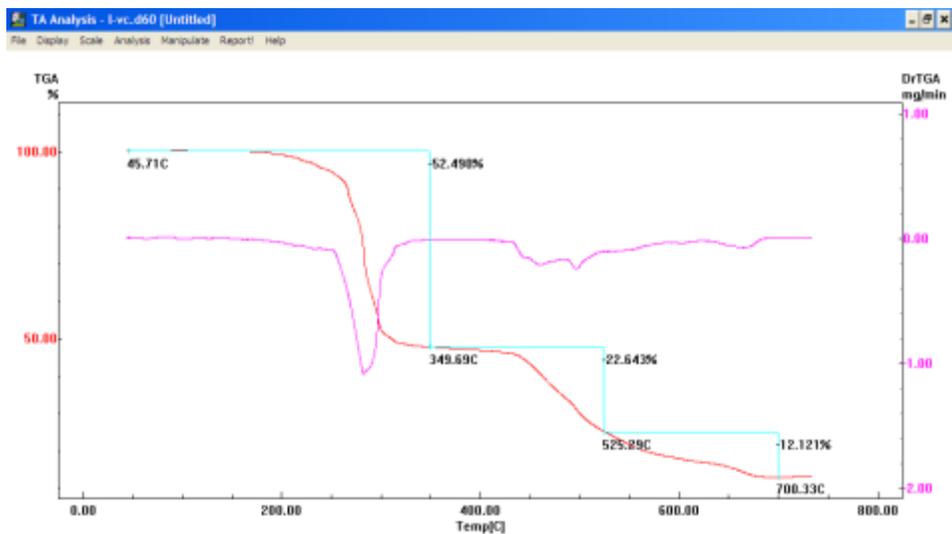


Figura C 25 – TGA amostra GMV-C

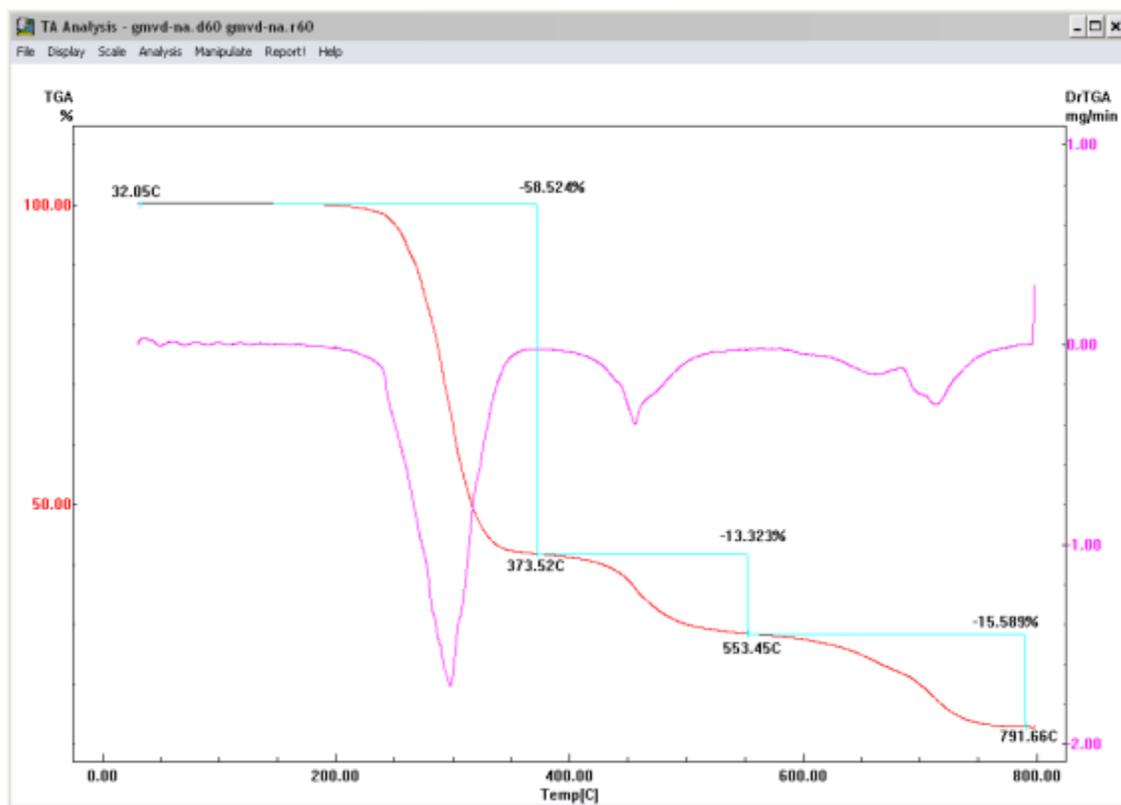


Figura C 26 – TGA amostra GMV-D

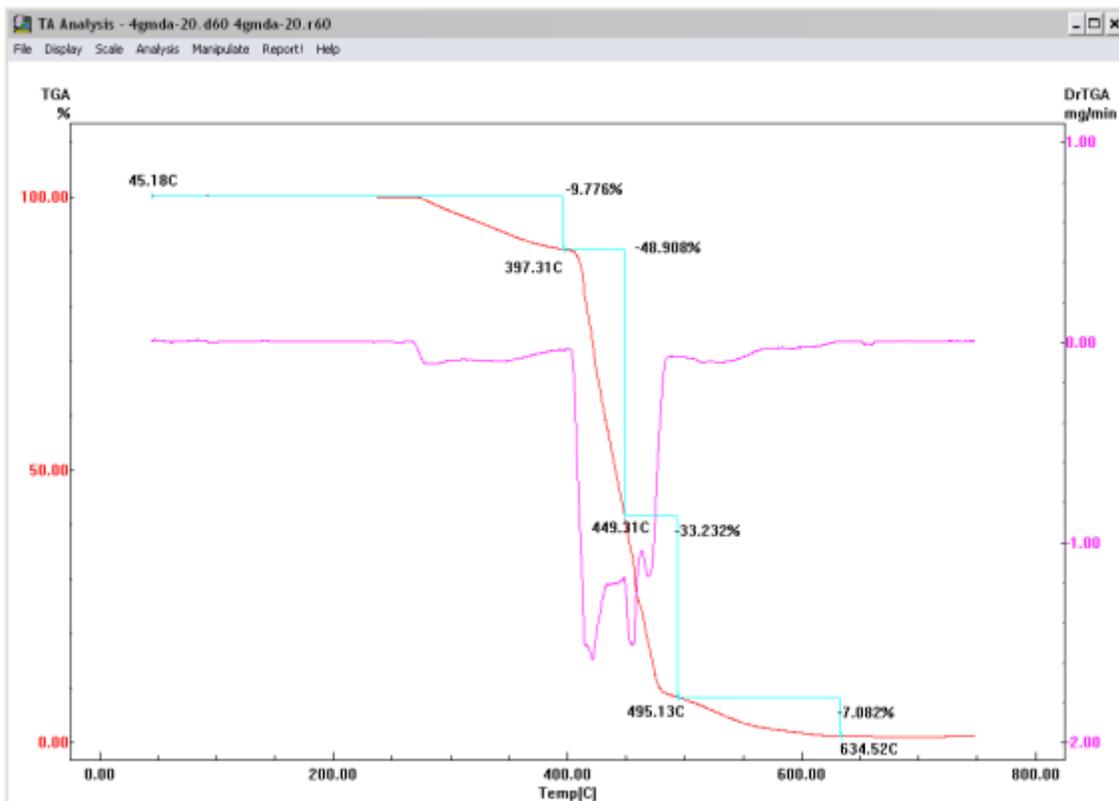


Figura C 27 – TGA amostra GMD-A-4ª Retirada

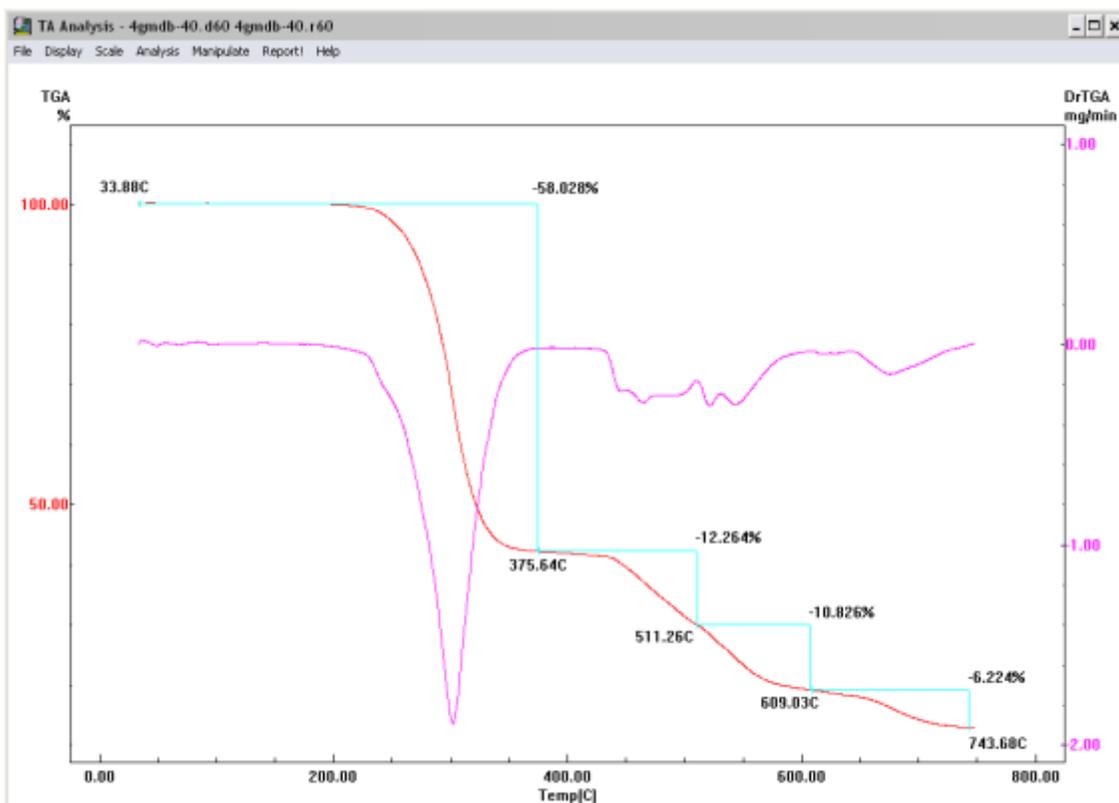


Figura C 28 – TGA amostra GMD-B-4ª Retirada

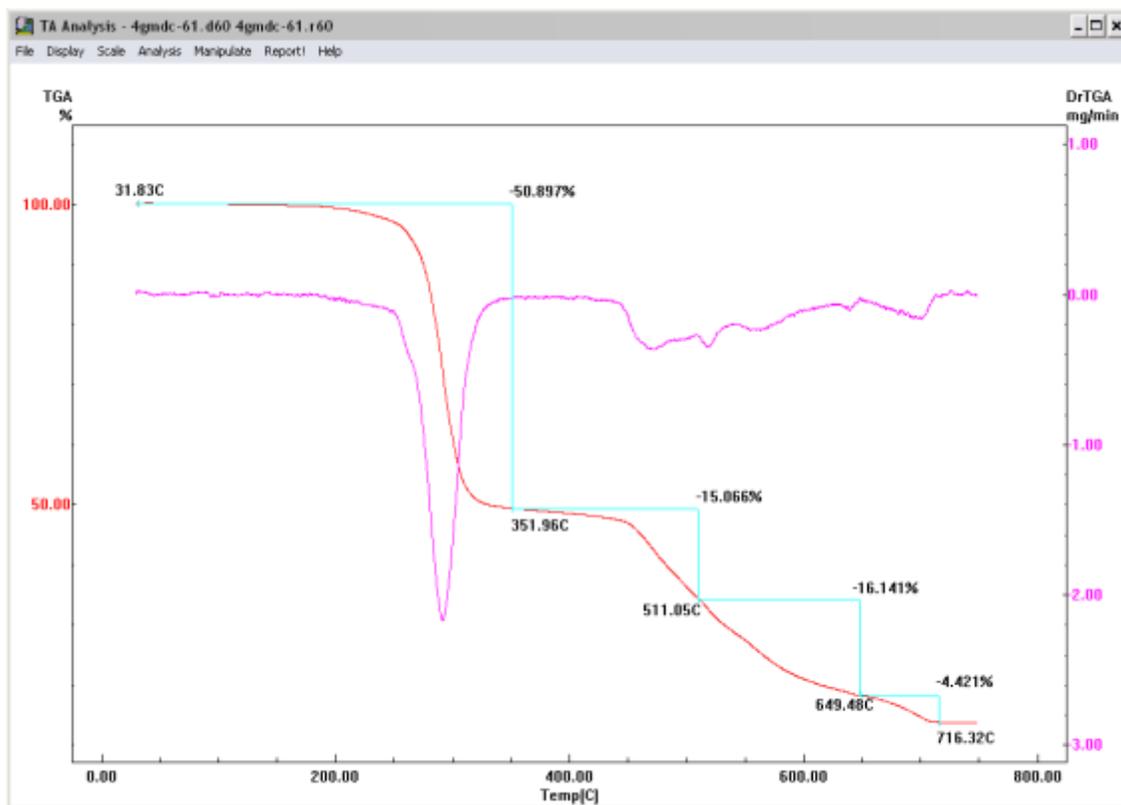


Figura C 29 – TGA amostra GMD-C-4ª Retirada

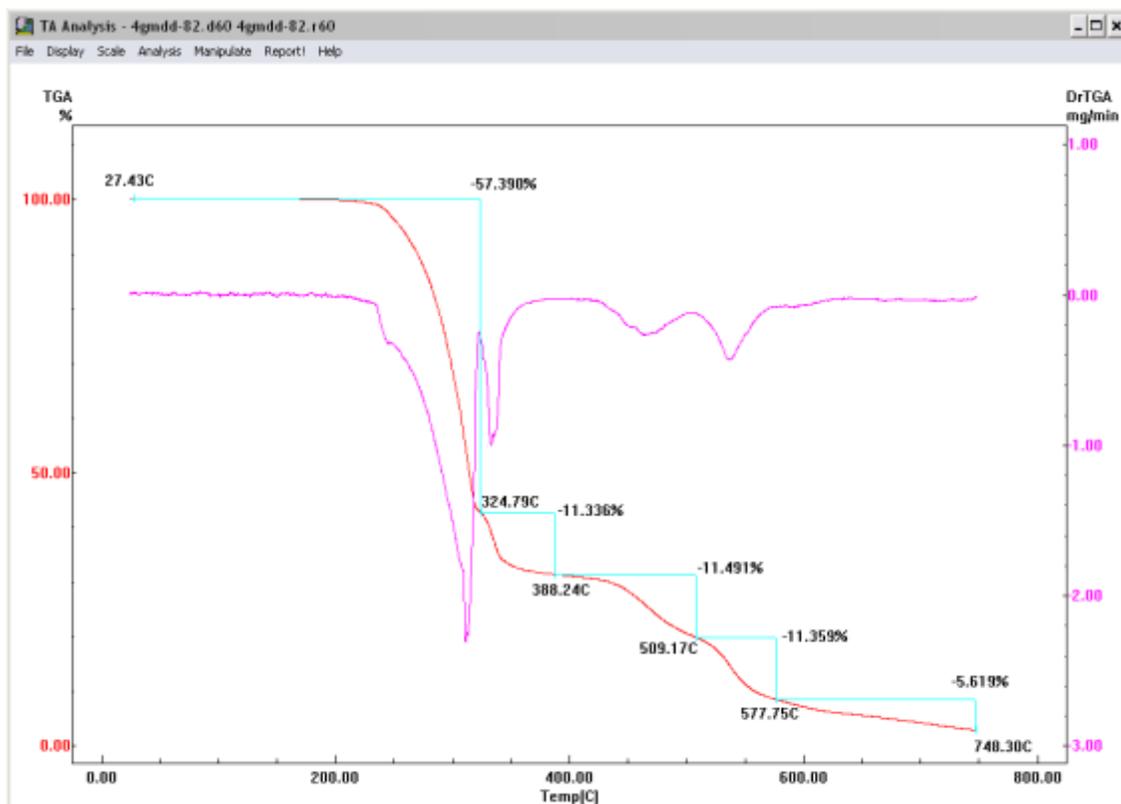


Figura C 30 – TGA amostra GMD-D-4ª Retirada

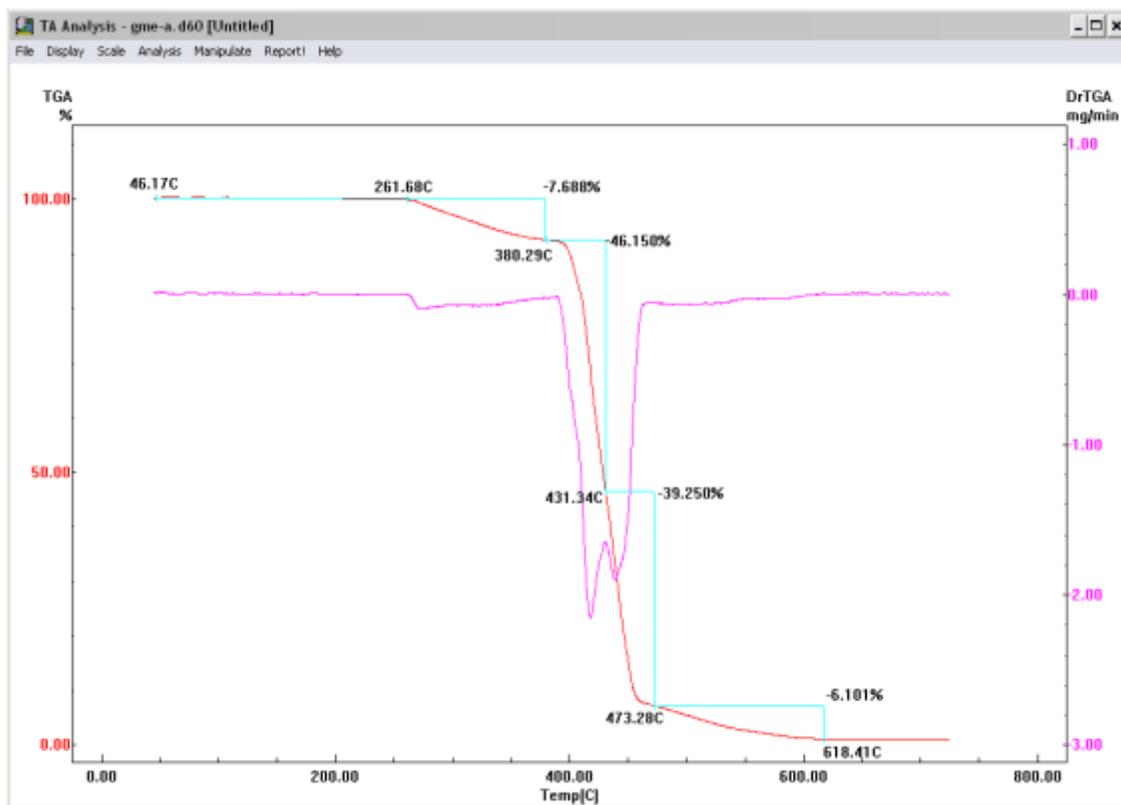


Figura C 31 – TGA amostra GME-A-3000h

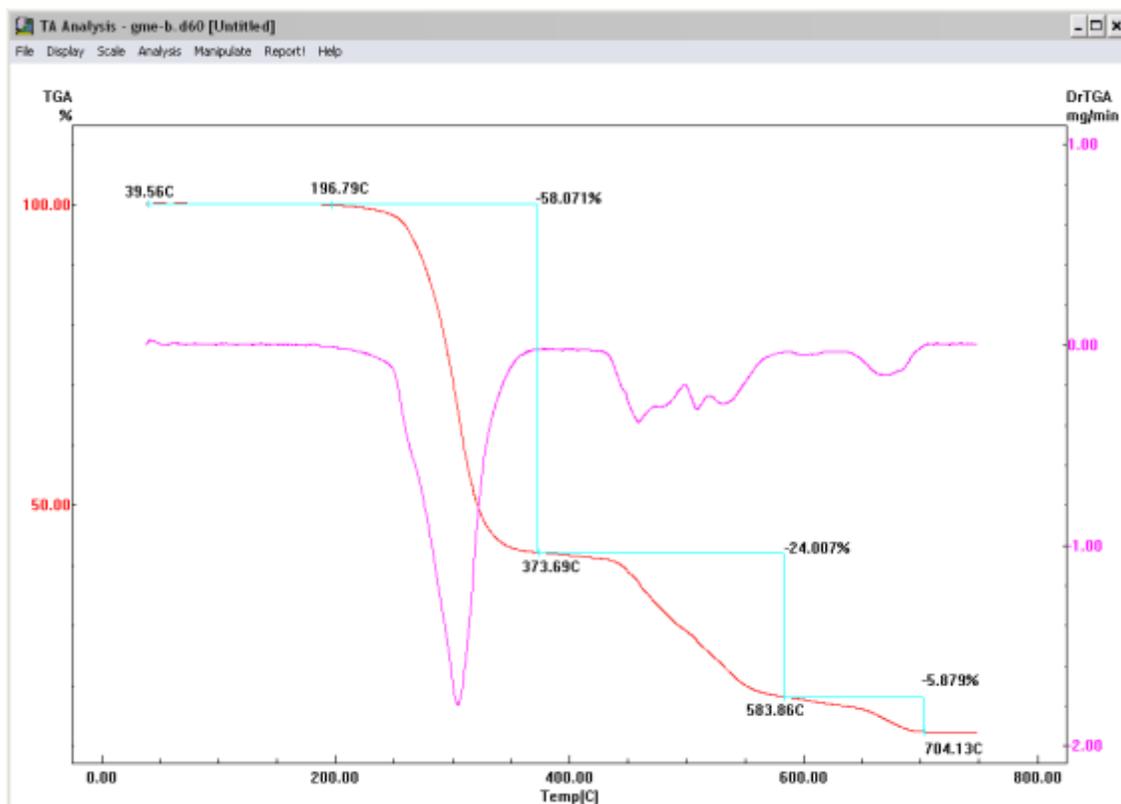


Figura C 32 – TGA amostra GME-B-3000h

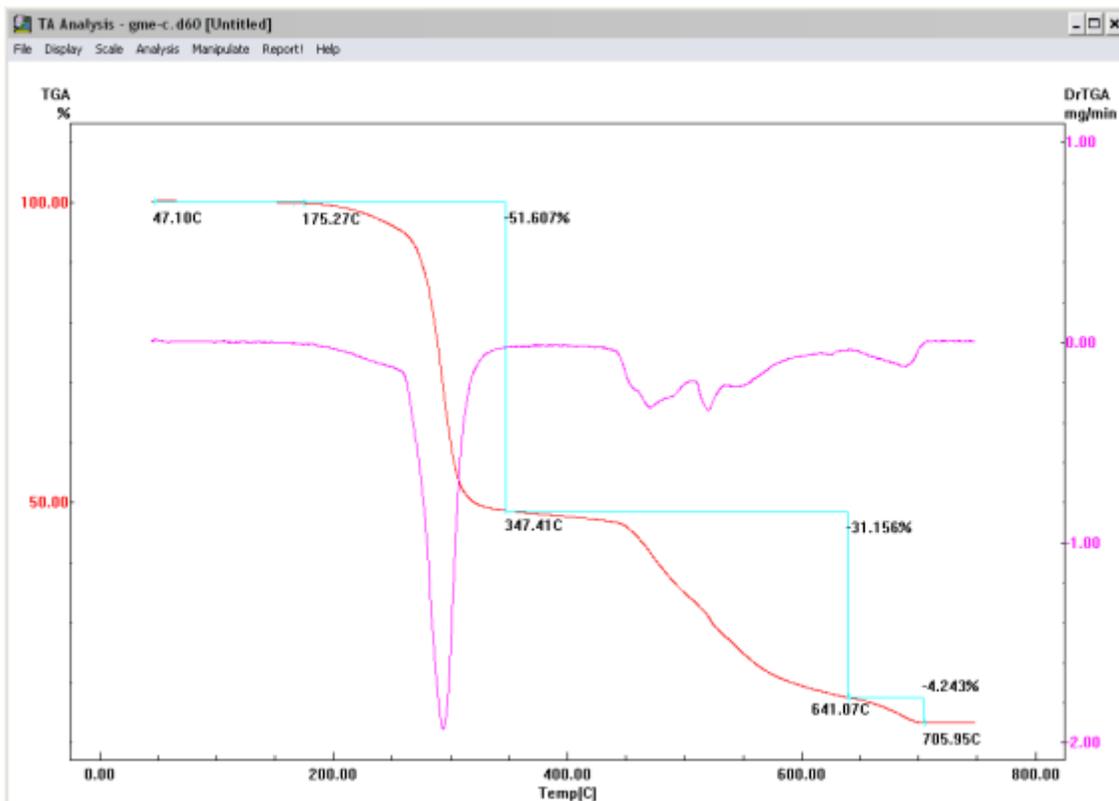


Figura C 33 – TGA amostra GME-C-3000h

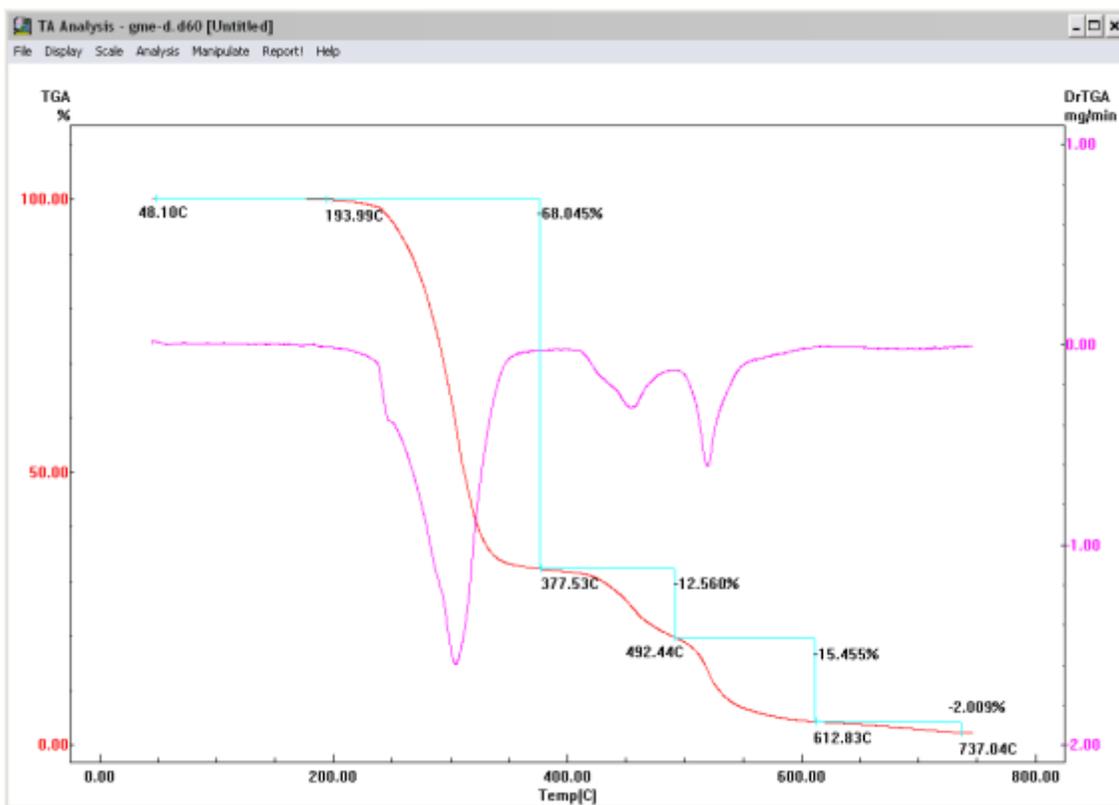


Figura C 34 – TGA amostra GME-B-3000h

APÊNDICE D

RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA DO FLUIDO DO LAGO III

		SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial CETIND - Centro de Tecnologia Industrial Pedro Ribeiro Av. Luiz Tarquínio Pontes, 938, Aracui, Lauro de Freitas-BA, CEP 42700-000 www.cetind.fieb.org.br, CNPJ 03.795.071/0004-69 Comercial: Tel. 71 3287-8265 / 8244 Fax 3287-8276 e-mail: laboratorio@cetind.fieb.org.br Outras informações: Tel. 71 3287-8280 / 8240 / 8255 / 8289 e-mail: admLaboratorio@cetind.fieb.org.br					
Relatório de Ensaios MQV N° 2799/10						Revisão	
Empresa:	MFB - Mineração Fazenda Brasileiro S/A	Fax:	(75)3616-5370				
Endereço:	MQB 607/10	CNPJ:	05.673.658/0001-88				
Localização:	Zona Rural, s/n	e-mail:	anselmo.oliveira@yamana.com raandrade@yamana.com				
Contato(s):	Ronaldo Andrade/Anselmo Andrade	Telefone:	(75)3616-5368/5384				
Amostragem:	Água Residual - Água do Lago III	Recepção:	06/05/10				
Código CETIND	2799/10-01	Amostra	Água do Lago III		Coleta em	04/05/10 15	
Ensaio	Resultado	Unidade	LDM	Método		Data do Ensaio	
Alumínio (Al) total	0,20	mg/L	0,02	EN301 ESP(EPA6010B/3010A Mod.)		11/05/10	
Ársênio (As) total ▯	6,54	mg/L	0,002	EN 002ESP(SMEWW3114B/C-AsMod.)		19/05/10	
Chumbo (Pb) total ▯	ND	mg/L	0,005	EN 203 ESP (ASTM D3559-03 D)		11/05/10	
Cobre (Cu) total	1,14	mg/L	0,002	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Cromo (Cr) total	ND	mg/L	0,001	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Ferro (Fe) solúvel	ND	mg/L	0,02	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		05/05/10	
Ferro (Fe) total	0,26	mg/L	0,02	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Manganês (Mn) total	0,043	mg/L	0,001	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Níquel (Ni) total	0,106	mg/L	0,003	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Sódio (Na) total	1070	mg/L	0,2	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Zinco (Zn) total	0,09	mg/L	0,02	EN 301 ESP (EPA 6010B/3010A)		11/05/10	
Alcalinidade total▯	95,3	mg CaCO ₃ /L	0,8	EN 003 QGI (SMEWW 2320 A/B)		18/05/10	
Amônia	38,6	mg/L	0,01	EN 039 QGI (SMEWW 4500 NH ₃ F)		26/05/10	
Chloro ▯	526	mg/L	0,010	EN 138 QGI (EPA 300.1-1)		14/05/10	
Fluoreto ▯	1630	mg/L	0,002	EN 138 QGI (EPA 300.1-1)		14/05/10	
Óxigênio Livre	0,860	mg/L	0,004	EN 142 QGI (ASTM D 6888 - 04)		24/05/10	
Óxigênio Total ▯	1,39	mg/L	0,003	M QGI 023 (SMEWW 4500 CN)		20/05/10	
Cor aparente	<5	mg/L Pt-Co	5	EN 011 QGI (SMEWW 2120 A/B)		06/05/10	
Acidez total ▯	1030	mg CaCO ₃ /L	1,0	EN 005 QGI (SMEWW 2340 A/B/C)		19/05/10	
Nitrogênio amoniacal	31,6	mg/L	0,01	EN 039 QGI (SMEWW 4500NH ₃ F)		26/05/10	
pH (Medição em campo)	Não Objetável	--	--	Organoléptico		04/05/10	
Condutividade (Medição em campo)	7,80	--	--	EN 013 COL (SMEWW 4500 H+ B)		04/05/10	
Defeito de Hidrogênio	ND	mg/L	0,01	EN 137 QGI (SMEWW 4500-S H)		21/05/10	
Defeitos	ND	mg/L	0,01	EN 155 QGI		10/05/10	
Indutividade ▯	5910	µS/cm	0,01	EN 030 QGI (SMEWW 2510 A/B)		07/05/10	
Temperatura (Medição em campo)	26,5	°C	--	IT 009 MQV (EI 91-a/ASTM E230)		04/05/10	
Óxigênio Residual Livre (Medição em campo)	0,18	mg/L	0,01	EN 019 COL (Interno)		04/05/10	
Turbidez ▯	2,14	NTU	0,64	EN 021 QGI (SMEWW 2130 B)		06/05/10	
Sólidos totais	4220	mg/L	2,5	EN 009 QGI		11/05/10	
Sólidos totais dissolvidos	2580	mg/L	2,5	EN 026 QGI		11/05/10	
Legenda							
Método: Método Interno baseado em método oficial modificado.							
SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th. Edition.							
ND: Não Detectado.							
LM: Limite de Detecção do Método.							