

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE ALGUNS GEOSSINTÉTICOS EM
CONTATO COM FLUIDOS AGRESSIVOS**

MARUSKA TATIANA NASCIMENTO DA SILVA BUENO

Orientador: ENNIO MARQUES PALMEIRA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-041/2007.

BRASÍLIA/DF

MARÇO/2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE ALGUNS GEOSSINTÉTICOS EM CONTATO COM
FLUIDOS AGRESSIVOS**

MARUSKA TATIANA NASCIMENTO DA SILVA BUENO

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR**

APROVADA POR:

PROF. ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)

PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF. PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF^a MARIA JOSÉ ARAÚJO SALES, DSc. (UnB)
(EXAMINADORA EXTERNA)

PROF^a. MARIA DAS GRAÇAS GARDONI, DSc (UFMG)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE MARÇO DE 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

BUENO, MARUSKA T. N. S.

Análise da Degradação de Alguns Geossintéticos em Contato com Fluidos Agressivos, 2007.

(xxvii), 200p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2007)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.

1. Geossintético

2. Ensaio de laboratório

3. Degradação química

4. Fluido agressivo

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BUENO, M. T. N. S. (2007). Análise da Degradação de Alguns Geossintéticos em Contato com Fluidos Agressivos. Tese de Doutorado, Publicação G. TD-041-/07 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF 200p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maruska Tatiana Nascimento da Silva Bueno

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Análise da Degradação de Alguns Geossintéticos em Contato com Fluidos Agressivos, 2007.

GRAU/ANO: Doutora em Ciências / 2007.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósito acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Maruska Tatiana Nascimento da Silva Bueno

End.: SQN 309, Bloco F, Aptº 110

CEP 70 755-060 – Brasília – DF - Brasil

DEDICATÓRIA

Ao Nosso Bom Deus que me deu força e coragem para concluir esta pesquisa em meio a tantos imprevistos;

A minha família que sempre torceu muito pelo meu sucesso e confiou em mim desde o dia em que decidi ser engenheira civil.

Em especial ao meu filho Mateus e ao meu esposo Cássio por todo amor, carinho e paciência comigo, principalmente nos meses de conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ennio pelo respeito e confiança em mim depositada;

A professora Maria José pela disponibilidade e atenção a todos os meus anseios e dúvidas principalmente na área de química;

A professora Graça pelo carinho e disponibilidade ao longo de todo o trabalho;

Aos professores da Geotecnia pelo acolhimento e profissionalismo constante para com todos da área;

Aos professores Jorge e Alex da Engenharia Mecânica pela atenção nos ensaios de RTS;

Ao amigo Felipe por todo o profissionalismo, responsabilidade e atenção ao longo de toda a pesquisa, em especial os ensaios termomecânicos;

Ao seu Arthur da Oficina de Engenharia Mecânica, por todo apoio na preparação das amostras para os ensaios de RTS;

A amiga Márcia Mascarenha pela preciosa ajuda nos momentos decisivos deste trabalho;

A todos os amigos da área de Geotecnia que me apoiaram e torceram pela conclusão deste trabalho;

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE ALGUNS GEOSSINTÉTICOS EM CONTATO COM FLUIDOS AGRESSIVOS

RESUMO

A utilização de geossintéticos em obras de proteção ambiental tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. No entanto, faz-se necessário conhecer o comportamento desses materiais no que se refere aos seus desempenhos e durabilidade quando submetidos a situações de risco. Partindo desse pressuposto, esta pesquisa avaliou por meio de ensaios mecânicos e térmicos o comportamento e efeitos de degradação em alguns geotêxteis e geomembranas existentes no mercado brasileiro nos estados virgens e após imersão em variados fluidos agressivos. Foram realizados ensaios de resistência à tração simples (RTS) e ensaios de análise termogravimétrica. Os tempos de imersão variaram de 3 até 24 meses. Esses intervalos de tempo foram determinados em função do comportamento das amostras após o contato com os fluidos. Algumas amostras degradaram-se completamente apenas com o contato com alguns fluidos, e nestes casos os tempos de imersão e as diluições foram reduzidas. Utilizou-se gasolina comum (GSC), soda cáustica sob diferentes níveis de diluição, e álcool diluído em 3% de água (ALC97). As análises do comportamento dos espécimes ensaiados foram realizadas baseadas em ensaios de termogravimetria (TG) e termomecânica (TMA). Ainda foram realizadas análises microscópicas em algumas amostras por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras de geomembranas com predominância de PVC (Poli (cloreto de vinila)) apresentaram enrijecimento nos primeiros tempos de imersão, principalmente quando o fluido agressivo foi a gasolina comum. Para os tempos subsequentes esse enrijecimento tendeu a diminuir. Em geral esse comportamento nas amostras de PVC foi comum para todos os fluidos. As amostras de geomembranas com predominância de PEAD (Polietileno de alta densidade) também apresentaram enrijecimento após o contato com os fluidos, porém em menores proporções que as amostras de PVC. Os resultados dos ensaios de RTS e de análise termogravimétrica confirmaram as transformações internas das geomembranas que permaneceram em imersão. Na maioria dos casos, tanto as amostras de PVC quanto as de PEAD apresentaram menores deformabilidade e maiores valores de resistência à tração simples, dependendo do tempo de imersão considerado. Quanto aos resultados de análise termogravimétrica o desempenho das amostras de PEAD foi melhor que o das amostras de PVC. Em relação aos geotêxteis ensaiados, todas as amostras

apresentaram bastante sensibilidade ao contato com as diluições de soda cáustica em água. Os geotêxteis se comportaram melhor em contato com GSC e ALC97 do que em contato com soluções que continham soda cáustica. Embora diferentes níveis de degradação ou de alteração de comportamento tenham sido observados, isso não necessariamente implica que o geossintético falharia na sua função (por exemplo, como barreira para fluidos) em uma, caso a repercussão da degradação não seja importante para a propriedade mais relevante para aquela função (coeficiente de permeabilidade, por exemplo). Além disso, as condições a que os espécimes foram submetidos nos ensaios podem ser significativamente mais severas que as esperadas no campo. No entanto, os resultados deste trabalho mostram que é importante avaliar a durabilidade e o comportamento desses materiais quando submetidos a ambientes ou substâncias agressivas.

ANALYSIS OF THE DEGRADATION OF SOME GEOSYNTHETICS IN CONTACT WITH AGGRESSIVE FLUIDS

ABSTRACT

The use of geosynthetics in environmental protection works is increasing markedly in the last decades. However, it is necessary to evaluate the behaviour of such materials regarding their durability and performance under aggressive conditions. Therefore, this research studied the characteristics and mechanical behaviour of some geotextiles and geomembranes available in Brazil after different periods of immersion in some fluids. Wide strip tensile tests, thermogravimetric and thermomechanical analyses were carried out. The duration of immersion of the geosynthetics in the fluids varied between 3 and 24 months. Some specimens degraded completely, depending on the fluid and geosynthetic considered. Because of that, dilution and/or reduction of immersion periods were used to reduce the aggressiveness of that particular fluid. The fluids employed were ordinary gasoline, caustic soda, under different solutions with water, and alcohol. Thermogravimetric (TGA) and thermomechanical (TMA) analyses were carried out. Scanning electronic microscopy analyses (SEM) were also used as part of the research programme. The PVC geomembranes tested showed increases in stiffness for the shorter immersion periods, particularly for tests with gasoline. For greater immersion periods this initial rigidity tended to decrease. In general, this behaviour of PVC geomembranes was the same for tests with the other fluids. HDPE geomembranes also showed some level of stiffness increase after immersion, but less than that observed for PVC. The wide strip tensile tests and thermogravimetric analyses confirmed the internal chemical changes in the polymeric structures of the materials after immersion. Depending on the immersion period both PVC and HDPE geomembranes showed initially greater tensile stiffness and tensile strength. The performance of the HDPE geomembranes was better than that of PVC geomembranes regarding the results of thermogravimetric analyses. All the geotextiles tested were affected by the contact with the fluids used in the research. They performed better when in contact with gasoline and alcohol than in contact with caustic soda. Although different levels of product degradation have been observed in the tests this does not necessarily mean that the geosynthetic would not fulfil its role (for instance, as a barrier) in a work if the repercussion of the degradation does not affect the most

relevant geosynthetic property for that role (permeability coefficient, for instance). Besides the conditions to which the specimens were subjected in the tests may be significantly more severe than those found in the field in many cases. Nevertheless, the results obtained enhance the importance of chemical compatibility tests on geosynthetics subject to aggressive environments or substances.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1) INTRODUÇÃO	1
1.1) JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	2
1.2) OBJETIVOS GERAIS DA PESQUISA.....	4
1.3) ORGANIZAÇÃO GERAL DA TESE	4
CAPITULO II.....	5
2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1) GEOSSINTÉTICOS.....	5
2.1.1) ESPECIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS.....	6
2.1.2) PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS.....	10
2.1.3) PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GEOSSINTÉTICOS.....	12
2.2) EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO USO DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA.....	14
2.3) EVOLUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS.....	17
2.4) DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS FACE AO MEIO AMBIENTE.....	19
2.5) APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL.....	19

2.6) PESQUISAS SOBRE A DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	20
2.7) DEGRADAÇÃO QUÍMICA NOS GEOSSINTÉTICOS.....	22
2.8) PRINCIPAIS SOLICITAÇÕES QUE PODEM OCORRER NOS GEOSSINTÉTICOS.....	24
2.9) CAPACIDADE DE SOBREVIVÊNCIA DOS GEOSSINTÉTICOS.....	26
2.10) DANOS NOS GEOSSINTÉTICOS CAUSADOS NA INSTALAÇÃO.....	29
2.11) INSPEÇÃO VISUAL NOS GEOSSINTÉTICOS DEGRADADOS.....	30
2.12) SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO COM GEOSSINTÉTICOS.....	33
2.13) RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS QUE TRATAM A RESPEITO DA UTILIZAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS COM REJEITOS PERIGOSOS...34	34
2.14) DEGRADAÇÃO E ESTABILIDADE TÉRMICA DOS POLÍMEROS.....	35
2.15) ANÁLISE TÉRMICA DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS	37
2.15.1) TERMOGRAVIMETRIA (TG)	38
2.15.2) CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	39
2.15.3) ANÁLISE TERMOMECAÂNICA (TMA).....	41
CAPÍTULO III.....	43
3) MATERIAIS E MÉTODOS.....	43

3.1) MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	44
3.1.1) GEOMEMBRANAS E GEOTÊXTEIS.....	44
3.1.2) FLUIDOS AGRESSIVOS.....	45
3.2) TEMPOS DE DEGRADAÇÃO.....	46
3.3) METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	47
3.3.1) EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SIMPLES (RTS).....	48
3.4) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA (TG)	51
3.5) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O ENSAIO DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL POR VARREDURA (DSC).....	54
3.6) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA ANÁLISE TERMOMECÂNICA (TMA).....	56
3.7) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A ANÁLISE MICROSCÓPICA	59
CAPÍTULO IV.....	64
4) APRESENTAÇÃO E ANÁLISE TÁCTIL-VISUAL DE GEOTÊXTEIS APÓS ENSAIOS MECÂNICOS.....	64
4.1) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO EM AMOSTRAS VIRGENS DE GEOTÊXTEIS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA POR MEIO DE IMERSÃO.....	64

4.2) RESULTADOS DAS AMOSTRAS DE GEOTÊXTEIS VIRGENS.....	64
4.3) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/A VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....	66
4.3.1) FLUIDO AGRESSIVO GSC	66
4.3.2) FLUIDO AGRESSIVO SC1%.....	70
4.3.3) FLUIDO AGRESSIVO SC50%	72
4.3.4) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%	76
4.4) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/B VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....	78
4.4.1) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%	79
4.4.2) FLUIDO AGRESSIVO SC1%	81
4.4.3) FLUIDO AGRESSIVO SC3%	84
4.5) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/D VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....	86
4.5.1) FLUIDO AGRESSIVO GSC.....	86
4.5.2) FLUIDO AGRESSIVO SC 1%	88
4.5.3) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%.....	92
4.6) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/E VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....	94
4.6.1) FLUIDO AGRESSIVO GSC.....	94
4.6.2) FLUIDO AGRESSIVO SC1%.....	97
4.6.3) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%.....	100
4.7) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG EM AMOSTRAS VIRGENS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA EM GEOTÊXTEIS (GTX) QUE PERMANECERAM EM IMERSÃO NO FLUIDO GSC.....	103

CAPÍTULO V.....112

5) APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE TÁCTIL-VISUAL PARA GEOMEMBRANAS APÓS ENSAIOS TERMOMECÂNICOS112

5.1) RESULTADOS DAS REDUÇÕES DE PESOS E DIÂMETROS DAS AMOSTRAS APÓS IMERSÃO EM GASOLINA.....112

5.1.1) RESULTADOS OBTIDOS PARA GEOMEMBRANAS GM/A (PVC - 1,0MM)....112

5.1.2) RESULTADOS PARA GEOMEMBRANAS GM/B (PVC – 2,0MM).....116

5.2-RESULTADOS DAS REDUÇÕES DE MASSA E DIÂMETRO DAS AMOSTRAS APÓS IMERSÃO NO FLUIDO SC50.....120

5.2.1-RESULTADOS PARA GEOMEMBRANAS GM/A (PVC – 1,0MM).....120

5.2.2-RESULTADOS PARA GEOMEMBRANAS GM/B.....123

5.3) RESULTADOS DE PERDA DE MASSA COM O ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA (TG).....126

5.3.1) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/A (PVC = 1,0MM) APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS....126

5.3.2) RESULTADOS DOS ENSAIOS TERMOMECÂNICOS (TMA) EM AMOSTRAS DE GM/A VIRGENS E APÓS IMERSÃO NOS FLUIDO GSC E SC50.....134

5.3.3) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/B APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....136

5.3.4) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/C APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....141

5.3.5) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/D APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS.....144

5.4) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE MICROSCÓPICA EM AMOSTRAS DE GEOMEMBRANAS VIRGENS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA146

5.5) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO SIMPLES EM AMOSTRAS DE GEOMEMBRANAS VIRGENS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA163

5.5.1) FLUIDO AGRESSIVO: GASOLINA COMUM (GSC).....163

5.5.2) FLUIDO AGRESSIVO: SODA CÁUSTICA DILUÍDA EM ÁGUA (PROPORÇÃO DE 50% DE ÁGUA E 50% DE SODA) - (SC50).....167

5.5.3) FLUIDO AGRESSIVO: ÁLCOOL DILUÍDO EM ÁGUA (PROPORÇÃO DE 3% DE ÁGUA E 97% DE ÁLCOOL-ALC97).....170

CAPÍTULO VI.....172

6) CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....172

6.1) CONSIDERAÇÕES FINAIS.....172

6.2) SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS175

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....176

ANEXO I.....178

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1- Aplicações dos geossintéticos em proteção ambiental.....	3
Figura 1.2 -Trincas no Solo.....	3

CAPITULO II

Figura 2.1 – Fluxograma do processo de fabricação de geomembranas (Koerner, 1997).....	8
Figura 2.2 - Fluxograma representativo dos ensaios para avaliação do comportamento mecânico em geossintéticos (Vidal, 1992).....	11
Figura 2.3 – Cronologia do aparecimento dos geossintéticos (Palmeira, 1992).....	15
Figura 2.4 - Diagrama esquemático das informações típicas fornecidas pelo DSC para amostras de Polímeros (Lucas et al., 2001).....	40
Figura 2.5 -Tipos de sondas utilizadas na análise termomecânica (Lucas et al. (2001)).....	41

CAPÍTULO III

Figura 3.1-Recipientes com os fluidos agressivos nos quais foram imersos os geossintéticos.....	47
Figura 3.2-Tela inicial do programa computacional para a realização do ensaio de RTS.....	49
Figura 3.3-Amostra de geotêxtil no início do ensaio de RTS.....	50
Figura 3.4-Vista geral do equipamento de RTS com um ensaio em andamento.....	50
Figura 3.5-Ensaio de RTS em andamento com amostra de geotêxtil.....	51
Figura 3.6 - Equipamento detalhado utilizado para o ensaio de termogravimetria (Lucas et al. 2001).....	53
Figura 3.7 - Equipamento de termogravimetria.....	54
Figura 3.8-Diagrama de blocos do DSC (Lucas et al. 2001).....	55
Figura 3.9-Equipamento de calorimetria diferencial por varredura - DSC.....	56

Figura 3.10 - Esquema do equipamento para análise termomecânica (Lucas et al. 2001).....	58
Figura 3.11-Equipamento Análise Termomecânica.....	59
Figura 3.12 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	60
Figura 3.13 – Parte do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	61
Figura 3.14 – Amostra sendo introduzida no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	61
Figura 3.15 – Amostras de geomembranas preparadas para serem digitalizadas no MEV.....	62
Figura 3.16 – Equipamento que proporciona a metalização das amostras.....	62
Figura 3.17 – Detalhe do equipamento onde as amostras metalizadas com o ouro.....	63

CAPÍTULO IV

Figura 4.1-Resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX virgens.....	66
Figura 4.2-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 3 meses).....	67
Figura 4.3-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 6 meses).....	68
Figura 4.4-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 12 meses).....	69
Figura 4.5-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).....	71
Figura 4.6-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).....	72
Figura 4.7-Aspecto dos geossintéticos – GTX e GM após imersão em SC50% (Tempo de imersão: 7 dias).....	73
Figura 4.8-Aspecto dos geossintéticos – GTX e GM após imersão em SC50% - Zoom de 5X (Tempo de imersão: 7 dias).....	74
Figura 4.9-Retirada do GTX/A do recipiente após contato com o fluido SC50%.....	75
Figura 4.10-Aspecto do GTX/A após contato com o fluido SC50%.....	76
Figura 4.11-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).....	77

Figura 4.12-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).....	78
Figura 4.13-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).....	79
Figura 4.14-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).....	80
Figura 4.15-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).....	82
Figura 4.16-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).....	83
Figura 4.17-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 9 meses).....	84
Figura 4.18-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC3% (Tempo de imersão: 3 meses).....	85
Figura 4.19-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 6 meses).....	87
Figura 4.20-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 12 meses).....	88
Figura 4.21-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).....	89
Figura 4.22-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).....	90
Figura 4.23-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 9 meses).....	91
Figura 4.24-Aspecto do GTX após 12 meses de imersão em SC1%.....	92
Figura 4.25-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).....	93
Figura 4.26-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).....	94
Figura 4.27-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 3 meses).....	95

Figura 4.28-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 6 meses).....	96
Figura 4.29-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 12 meses).....	97
Figura 4.30-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).....	98
Figura 4.31-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).....	99
Figura 4.32-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 9 meses).....	100
Figura 4.33-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).....	101
Figura 4.34-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).....	102
Figura 4.35 - Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GTX/A ($\mu = 200\text{g/m}^2$) após imersão em GSC.....	104
Figura 4.36 – Curvas DTG para amostras de geomembranas de geotêxteis (GTX/A) ($\mu = 200\text{g/m}^2$) virgem e após imersão em GSC.....	105
Figura 4.37 - Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GTX/B ($\mu = 200\text{g/m}^2$) de outro fabricante após imersão em GSC.....	106
Figura 4.38 – Curvas DTG para amostras de geomembranas de geotêxteis (GTX/B) ($\mu = 200\text{g/m}^2$) virgem e após imersão em GSC.	107
Figura 4.39 – Amostras de geotêxteis armazenadas em caixas de madeira, já com sinais visíveis de degradação.....	109
Figura 4.40 – Aspecto dos geotêxteis após imersão de 7 dias em soda cáustica na diluição de 5% (SC5%) em água.....	110
Figura 4.41 – Aspecto dos geotêxteis após imersão de aproximadamente 30 dias em soda cáustica na diluição de 50% em água.....	111

CAPÍTULO V

Figura 5.1-Geomembrana virgem e geomembrana após 1 mês de imersão em gasolina comum.....	114
Figura 5.2 - Relação M_m/M_o das amostras de GM/A em gasolina comum versus tempo de imersão.....	115
Figura 5.3 - Relação do D_m/D_o das amostras de GM/A em gasolina comum versus tempo de imersão.....	116
Figura 5.4 - Relação M_m/M_o das Amostras de GM/B em gasolina comum versus tempo de Imersão.....	118
Figura 5.5 - Relação D_m/D_o das Amostras de GM/B em Gasolina Comum Versus Tempo de Imersão	119
Figura 5.6 - Relação de M_m/M_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/A no fluido SC50.....	122
Figura 5.7 - Relação D_m/D_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/A no fluido SC50.....	123
Figura 5.8 - Relação M_m/M_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/B no fluido SC50.....	125
Figura 5.9 - Relação de D_m/D_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/B no fluido SC50.....	125
Figura 5.10 – Representação gráfica da relação entre as variações de temperaturas de decomposição de geomembranas de PVC (e=1,0mm) e variados tempos de imersão em GSC.....	127
Figura 5.11 – Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GM/A (e = 1,0mm) após imersão em GSC.....	128
Figura 5.12 - Curvas DTG para amostras de geomembranas de PVC (e = 1mm) virgem e após imersão em gasolina comum.....	129
Figura 5.13 – Representação gráfica da relação entre as variações de temperaturas de decomposição de geomembranas de PVC (e = 1,0mm) e variados tempos de imersão em SC50.....	131

Figura 5.14 - Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GM/A (e = 1,0mm) virgem e após imersão em SC50.....	132
Figura 5.15 - Curvas DTG para amostras de GM/A (e = 1,0mm) virgem e após imersão em SC50.....	133
Figura 5.16 – Curvas TMA para as geomembranas de PVC virgem e após imersão no fluido GSC.....	135
Figura 5.17 – Curvas TMA para as geomembranas de PVC virgem e após imersão no fluido SC50.....	136
Figura 5.18 - Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GM/B (e = 2,0mm) virgem e após imersão em SC50.....	137
Figura 5.19 – Curvas DTG para amostras de GM/B (e = 2,0mm) virgem e após imersão em SC50.....	138
Figura 5.20- Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GM/B (e = 2,0mm) virgem e após imersão em GSC.....	140
Figura 5.21- Curvas DTG para geomembranas GM/B virgem e após imersão no fluido GSC...141	
Figura 5.22 - Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GM/C (e =1,0mm) após imersão em GSC.....	142
Figura 5.23 - Curvas DTG para geomembranas GM/C virgem e após imersão no fluido GSC..143	
Figura 5.24 - Resultados do ensaio de Termogravimetria em amostras de GM/D (e = 2,0mm) após imersão em GSC.....	144
Figura 5.25 - Curvas DTG para geomembranas GM/D virgem e após imersão no fluido GSC..145	
Figura 5.26 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 100 vezes – lado fosco).....	147
Figura 5.27 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 350 vezes – lado fosco).....	147
Figura 5.28 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado fosco).....	148
Figura 5.29 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado fosco).....	149
Figura 5.30 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 100 vezes – lado brilhante).....	150

Figura 5.31 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 350 vezes – lado brilhante).....	150
Figura 5.32 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado brilhante).....	151
Figura 5.33 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado brilhante).	151
Figura 5.34 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 100 vezes – lado brilhante).....	152
Figura 5.35 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 350 vezes – lado brilhante).....	153
Figura 5.36 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 100 vezes – lado fosco).....	153
Figura 5.37 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 350 vezes – lado fosco).....	154
Figura 5.38 – Superfície de geomembrana GM/B virgem (aumento de 100 vezes – lado fosco).....	155
Figura 5.39 – Superfície de geomembrana GM/B virgem (aumento de 350 vezes – lado fosco).....	155
Figura 5.40 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado fosco).....	156
Figura 5.41 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado fosco).....	157
Figura 5.42 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 100 vezes – lado fosco).....	158
Figura 5.43 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 350 vezes – lado fosco).	159
Figura 5.44 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado brilhante).....	160
Figura 5.45 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado brilhante).....	160

Figura 5.46 – Superfície de geomembranas GM/B virgem (Aumento de 40 vezes – lado brilhante).....	161
Figura 5.47 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 40 vezes – lado brilhante).....	162
Figura 5.48 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 40 vezes – lado brilhante).....	162
Figura 5.49– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/A virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.....	164
Figura 5.50– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/B virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.....	165
Figura 5.51– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/C virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.....	166
Figura 5.52– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/D virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.....	167
Figura 5.53– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/C virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido SC50 por variados tempos.....	169
Figura 5.54– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/D virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido SC50 por variados tempos.....	170
Figura 5.55– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/B virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido ALC97 por variados tempos.....	171

ANEXO I

Figura 01-Tela Inicial para abertura do arquivo onde foram gravados os ensaios.....	178
Figura 02-Primeira tela do programa computacional para serem iniciados os procedimentos de ensaio.....	179
Figura 03-Abertura do programa para o início do ensaio.....	180
Figura 04-Abertura do arquivo dentro da pasta de trabalho.....	181
Figura 05-Parâmetros necessários para o ensaio (velocidade e deslocamento máximo).....	182
Figura 06-Tela ilustrativa com a verificação dos detectores (Força, deslocamento ou tensão)...183	
Figura 07-Detectores (Foram habilitados os detectores de força e deslocamento).....	184

Figura 08-Tela onde os novos parâmetros do ensaio são assimilados pelo programa.....	185
Figura 09-Tela com a indicação do acionamento para o controle manual na prensa (Colocação da amostra).....	186
Figura 10-Tela que controla a força e o deslocamento no ensaio (Desativado o controle manual, após a colocação da amostra).....	187
Figura 11-Tela com os procedimentos de partida para serem acionadas as bombas que controlam o fluido responsável pelo funcionamento da prensa.....	188
Figura 12-Tela com os procedimentos de partida para o acionamento da primeira bomba (HPS1).....	189
Figura 13-Tela com os procedimentos de partida para o acionamento da segunda bomba (HSM 1).....	190
Figura 14-Tela com o acionamento das duas bombas (HPS 1 e HSM 1).....	191
Figura 15- Telas onde a força e o deslocamento foram zerados antes do ensaio.....	192
Figura 16- Telas onde a força e o deslocamento foram acionados.....	192
Figura 17- Tela ilustrativa com o “ Reset” para o início do ensaio.....	193
Figura 18- Abertura do gráfico para o acompanhamento do ensaio.....	194
Figura 19- Tela ilustrativa onde os parâmetros do gráfico foram alterados.....	195
Figura 20- Tela ilustrativa onde foi acionado o controle do ensaio pelo programa.....	196
Figura 21- Início do ensaio.....	197
Figura 22- Gráfico de um ensaio dentro do programa.....	198
Figura 23-Final do ensaio.....	199
Figura 24-Tela ilustrativa onde a força foi zerada e o controle manual foi habilitado para a retirada da amostra.....	200

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 – Fatores de redução com respeito à degradação química, Azambuja (1994).....	24
Tabela 2.2 – Classificação simplificada da capacidade de sobrevivência dos geossintéticos (Azambuja, 1994 – adaptado de Chistopher e Holtz, 1991).....	26
Tabela 2.3 – Classificação da capacidade de sobrevivência requerida (Allen, 1991).....	27
Tabela 2.4 – Intervalo de fatores de redução por dano mecânico para geotêxteis sugeridos na literatura (Azambuja, 1997).....	29
Tabela 2.5 – Tipologia e classificação das lesões em geotêxteis não tecidos (Azambuja,1994).....	32
Tabela 2.6 – Fatores de redução de danos mecânicos para geotêxteis não tecidos, (Azambuja,1994).....	32

CAPÍTULO III

Tabela 3.1- Características das Geomembranas - Dados dos Fabricantes.....	44
Tabela 3.2- Propriedades Características dos Geotêxteis - Dados dos Fabricantes.....	45
Tabela 3.3 – Programação de ensaios Realizados em Amostras, Virgens e Degradadas Quimicamente.....	63

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1- Resultados de Resistência a Tração Simples (RTS) em amostras ensaiadas no estado virgem.....	65
Tabela 4.2 - Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GTX/A imersas no fluido GSC.....	108

Tabela 4.3 -Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GTX/D imersas no fluido GSC.....	108
--	-----

CAPÍTULO V

Tabela 5.1-Resultados de Massas e Diâmetros das Geomembranas GM/A Imersas em Gasolina Comum.....	113
Tabela 5.2- Resultados de Massas e Diâmetros das Geomembranas GM/B Imersas em Gasolina Comum.....	117
Tabela 5.3-Comparação entre as reduções de massas e diâmetros medidos para as amostras de GM/A e GM/B após imersão em gasolina comum, pelo período de até 12 meses.....	120
Tabela 5.4-Resultados de Massas e Diâmetros das Geomembranas GM/A Imersas no Fluido SC50.....	121
Tabela 5.5-Resultados de massas e diâmetros das geomembranas GM/B imersas no fluido SC50.....	124
Tabela 5.6-Comparação das reduções de massa e diâmetros medidos para as amostras de GM/A e GM/B após Imersão de 12 meses no Fluido SC50.....	126
Tabela 5.7 - Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras GM/A imersas no fluido GSC.....	130
Tabela 5.8 - Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras GM/A imersas no fluido SC50.....	134
Tabela 5.9-Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de PVC (2mm) imersas no fluido SC50.....	139
Tabela 5.10-Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GM/D imersas no fluido GSC.....	146

LISTA DE SÍMBOLOS

M_A = Gramatura ou massa surfácica
 t_{GT} = Espessura
 n_{GT} = Porosidade
 ρ_f = Densidade da fibra/filamento
 γ_a = Massa específica da água
 t_{GM} = Espessura nominal
 t_{GM}' = Espessura funcional
 ϕ = Diâmetro do grão
 U_d = Perímetro específico das lesões
 c = Comprimento
 T = Temperatura
 T_g = Temperatura de transição vítrea
 T_c = Temperatura de cristalização
 T_m = Temperatura de fusão do material
 C_p = Calor específico
 $?H_f$ = Calor de fusão
 $?H_c$ = Calor de cristalização
 $?H_r$ = Calor de reação

CAPÍTULO I

1) INTRODUÇÃO

A humanidade enfrenta crescentes problemas devido a danos causados pela degradação ambiental, por isso há uma preocupação cada vez maior com a proteção dos recursos naturais do nosso planeta.

O termo geotecnia ambiental relaciona-se aos estudos e tecnologias geotécnicas voltados à prevenção da poluição do ar, do solo e de recursos hídricos superficiais e subterrâneos do solo. A responsabilidade do engenheiro geotécnico que atua nesta área deve estar direcionada à proteção do meio ambiente contra todas as formas de poluição causadas direta ou indiretamente pelo homem, incluindo a geração e disposição inadequadas de resíduos domiciliares, industriais e hospitalares, além do abandono e degradação destas áreas, quer pela poluição dos terrenos, quer pela poluição do lençol freático.

Devido a crescente escassez dos recursos naturais, os materiais sintéticos se tornaram uma ferramenta de grande utilidade na área ambiental. A utilização de geossintéticos em obras de proteção ao meio ambiente decorre da necessidade de proteger o solo e lençóis subterrâneos onde estão dispostos os resíduos sólidos e efluentes líquidos, sendo perigosos ou não. O perfeito funcionamento deste sistema de impermeabilização depende das condições físicas das camadas de geossintéticos utilizadas nestas obras. Deve-se evitar ou pelo menos minimizar os danos gerados nas superfícies destes materiais, que podem surgir durante a execução e/ou ao longo da vida útil da obra.

Este trabalho tem o objetivo de investigar, por meio de ensaios microscópicos e de laboratório, os mecanismos de danos mecânico e químico nos geossintéticos em obras de proteção ambiental, avaliando as suas causas e conseqüências. Assim, os engenheiros geotécnicos terão subsídios concretos a respeito do comportamento destes materiais mediante tais solicitações.

1.1) JUSTIFICATIVA DO TEMA

Este trabalho foi concretizado devido à necessidade do conhecimento de alternativas viáveis de proteção do solo e lençol freático. Ao longo dos quatro anos de pesquisa, foram observadas inúmeras situações que comprometiam o meio ambiente, podendo-se mencionar poluição do solo por meio de vazamentos em postos de gasolina, aterros sanitários, fluidos de mineradoras lançados diretamente no solo, dentre outros.

A utilização de geossintéticos é uma das alternativas mais viáveis de materiais não convencionais destinados à proteção do meio ambiente. No entanto, ainda existem poucos estudos no Brasil a respeito de degradação de geossintéticos. Os países ditos de primeiro mundo já utilizam os geossintéticos comumente em seus projetos de engenharia, porém faz-se necessário conhecer o comportamento destes materiais após o contato com os inúmeros compostos que são lançados, muitas vezes, diretamente no meio ambiente. As Figuras 1.1 (a) e (b) apresentam algumas utilizações de geossintéticos, todas com o objetivo de proteger o meio ambiente. A Figura 1.2 apresenta trincas observadas no solo de uma lagoa de tratamento situada em Samambaia-DF, percebe-se a necessidade de proteger o terreno, para dificultar a percolação de contaminantes, o que pode ser conseguido com a adição de camada(s) de geomembrana.



(a)



(b)

Figura 1.1-Aplicações dos geossintéticos em proteção ambiental.



Figura 1.2-Trincas no solo.

1.2) OBJETIVOS GERAIS DA PESQUISA

Os objetivos da presente pesquisa foram os seguintes:

- Simular a degradação química em amostras que foram submetidas ou não ao ensaio de dano mecânico, através da colocação de fluido agressivo, no qual permanecerá por um determinado tempo.
- Analisar a perda de resistência destes materiais após a degradação mecânica aliada ou não à química através do ensaio de Resistência a Tração Simples (RTS).
- Efetuar ensaios com geomembranas PEAD e PVC para efeito de comparação de resultados tanto de resistência como de porcentagem de dano na superfície após os ensaios de dano mecânico associado ou não ao químico;
- Verificar a influência do geotêxtil como proteção da geomembrana nas obras de disposição de resíduo comparando com os ensaios sem a proteção com geotêxtil;
- Verificar a influência da variação de temperatura nos resultados de ensaios.

1.3) ORGANIZAÇÃO GERAL DA TESE

O capítulo 1 faz uma apresentação geral da tese, sua justificativa e objetivos. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre utilização de geossintéticos em obras de proteção ao meio ambiente e características e propriedades relevantes destes materiais. No capítulo 3 são apresentados os equipamentos e metodologia dos ensaios. Os capítulos 4 e 5 apresentam os resultados obtidos e análises. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

CAPITULO II

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta algumas considerações a respeito da utilização de materiais sintéticos em obras de engenharia, tipos e aplicações de geossintéticos, assim como importantes colocações sobre polímeros.

2.1) GEOSSINTÉTICOS

O homem vem executando trabalhos de engenharia progressivamente mais complexos e eficientes com o objetivo de proteger-se dos perigos do cotidiano e das intempéries. Os elementos materiais de construção mais utilizados são: madeira, pedra e metais, e, mais recentemente, os materiais poliméricos.

Os materiais poliméricos são obtidos a partir da combinação, por meio de reações químicas, de moléculas de baixo peso molecular denominadas monômeros, constituindo os polímeros, cujas propriedades e comportamentos se diferenciam, em função do processo de fabricação, em tipo e disposição estrutural de suas fibras, entre outros fatores (Matheus, 2002). Os polímeros mais comumente utilizados na fabricação de geossintéticos são: polipropileno (PP), polietileno (PE), poliéster (PET) e a poliamida (PA) (Abramento, 1995).

A presença de um geossintético como inclusão em um solo tem por objetivo basicamente cumprir uma ou mais das seguintes funções (Vidal,1999):

- *Drenagem* : Coleta e condução de um fluido através ou pelo corpo de um geossintético;
- *Filtração* : Retenção do solo ou de outras partículas, permitindo passagem livre do fluido em movimento;

- *Barreira*: Bloqueio ou desvio de fluxo;
- *Proteção*: Limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas;
- *Reforço*: Utilização das propriedades mecânicas dos geotêxteis ou produtos correlatos para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica;
- *Separação*: Ação de impedir a mistura de dois solos e/ou materiais adjacentes de natureza diferente.

2.1.1) ESPECIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

As informações técnicas mais apropriadas para a correta utilização dos geossintéticos deve conter:

- As propriedades requeridas para satisfazer as funções a que o produto será submetido e que serão consideradas no projeto;
- As propriedades requeridas durante a instalação e/ou execução da obra;
- As propriedades requeridas para garantir a durabilidade destes materiais ao longo da vida útil da obra.

Giroud (1989) cita outras exigências a respeito de especificações de geossintéticos:

- Ensaio para aceitação do produto: frequência, tamanho e técnica de amostragem e um programa de ensaios que solicite detalhes, quando necessário (por exemplo: módulo à 2% de deformação, transmissibilidade sob pressão, etc);
- Critérios de aceitação e procedimentos para rejeição;

- Fornecimentos do produto: cuidados com embalagem, identificação, transporte, manuseio, condições e tempo de estocagem;
- Condições de instalação: dimensões do rolo, direção de instalação, manuseio, tipo de juntas, equipamento necessário e método de colocação dos materiais adjacentes.

A especificação de um geossintético deve ser baseada numa normalização que garanta a repetibilidade de resultados de ensaios e que fixe metodologias para determinação de propriedades relevantes. É importante que exista um sistema de controle que fiscalize os dados dos produtos e garantam sua confiabilidade, conforme os existentes para outros produtos empregados na engenharia civil.

Os geossintéticos podem ser manufaturados a partir de diferentes polímeros e por variadas formas de fabricação. Koerner (1990) apresenta as diversas formas de fabricação de geossintéticos, e a Figura 2.1, esquematiza os processos de fabricação de geomembranas.

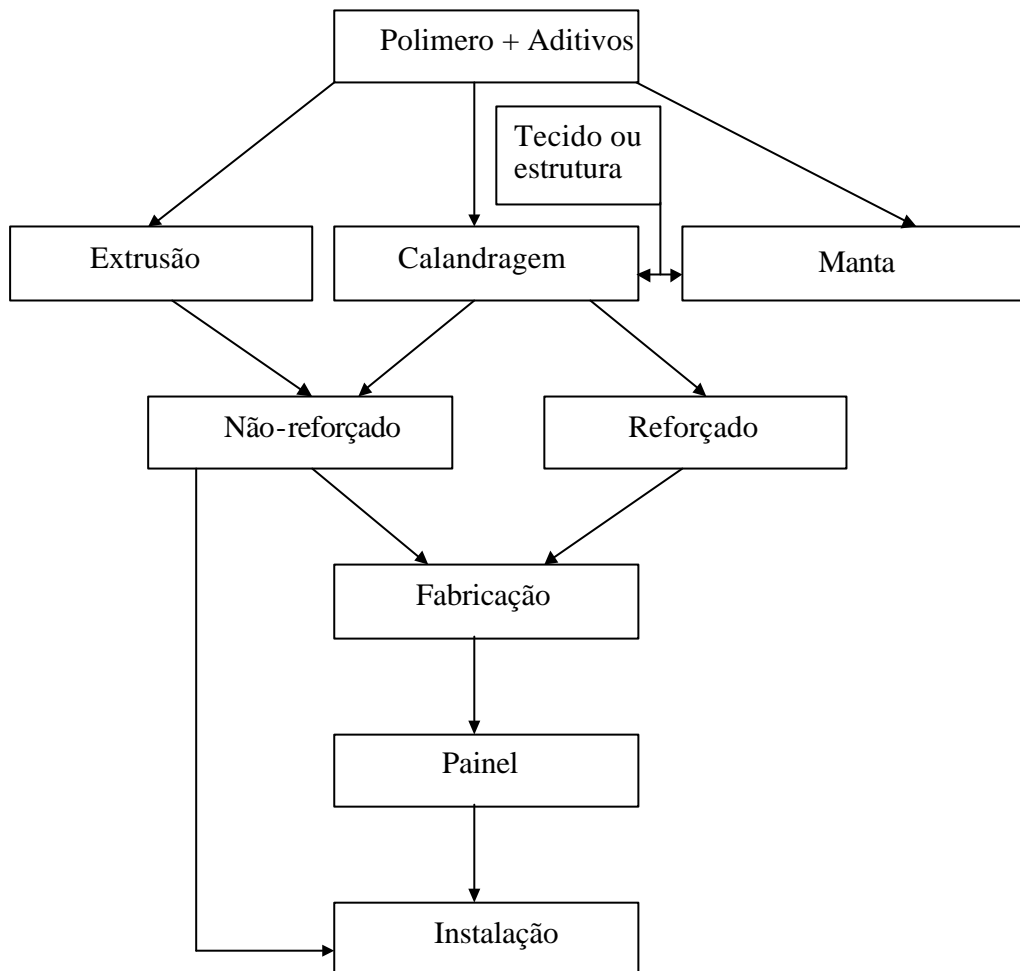


Figura 2.1 – Fluxograma do processo de fabricação de geomembranas (Koerner, 1997).

As principais famílias de polímeros utilizadas na confecção de geossintéticos são: poliéster, poliamida, polipropileno e polietileno. Deve-se observar que o processo de fabricação do geossintético pode alterar sensivelmente as propriedades dos produtos finais.

A especificação, terminologia e descrição dos geossintéticos, mais utilizados no meio profissional, é a seguinte (Vidal, 1992):

Geotêxteis: Estes foram os primeiros tipos de geossintéticos empregados em geotecnia. Dividem-se genericamente em tecidos e não tecidos em função do arranjo estrutural das suas fibras ou filamentos. Nos geotêxteis tecidos o arranjo estrutural dos fios é ordenado, com o lançamento dos

mesmos em duas direções, em geral ortogonais, ao longo da manta. Já nos geotêxteis do tipo não tecido o arranjo estrutural dos fios na manta é aleatório, sem que se possam distinguir direções preferenciais de lançamento dos mesmos.

Geogrelhas: caracterizam-se pela combinação de membros transversais e longitudinais, formando uma grelha, podendo interagir com o solo envolvente por atrito e ancoragem. Um destes mecanismos pode ser predominante em função da sua geometria. Convencionou-se chamar de membros transversais (ou de ancoragem) aqueles responsáveis pela ancoragem da grelha no solo envolvente. Assim, os membros longitudinais são responsáveis pela transmissão de carga ao longo do comprimento da grelha e por interagirem por atrito de interface com o solo circundante.

Geotiras: São elementos utilizados como reforço em que uma dimensão é muito maior que as demais. Foram inicialmente desenvolvidas para substituírem tiras metálicas em aplicações de reforço de solos.

Geocélulas: São células para confinamento de solo, ou outro material, confeccionadas a partir de geogrelhas ou de material plástico. São geralmente empregadas para a estabilização de grandes aterros construídos sobre solos moles ou para proteção de taludes contra erosão.

Geodrenos: São tubos ou tiras plásticas ranhuradas envoltas por material drenante (geotêxtil não-tecido, em geral) utilizadas como drenos verticais sob aterros ou como elementos drenantes em taludes, no paramento interno de estruturas de contenção, etc.

Geomembranas: São empregadas como barreiras de baixa permeabilidade para fluidos e gases. São geralmente utilizados em barragens, reservatórios, canais, depósitos de lixo de rejeitos industriais, entre outros.

Geocompostos: São geossintéticos resultantes da combinação de diferentes materiais como, por exemplo: geotêxtil tecido + geotêxtil não-tecido, geotêxtil + geogrelha, geotêxtil + geomembrana, entre outros.

Geocompostos argilosos: Resultante da combinação de uma fina camada de bentonita e uma ou mais camadas de geossintéticos. A bentonita é um material argiloso com elevado potencial expansivo e capacidade de absorção de água.

Misturas de fios sintéticos contínuos ou pedaços de geogrelhas e solo (fibra-solo) por equipamentos mecânicos especiais: Esta é uma aplicação mais recente. A combinação do material sintético ao solo resulta num material composto final com melhores características mecânicas. Este tipo de reforço de solo tem sido aplicado a aterros e pavimentos na França, por exemplo.

2.1.2) PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

Em obras de proteção ambiental devem ser considerados vários tipos de solicitações, em diferentes fases: durante o transporte e armazenagem, durante a instalação, na execução de emendas e testes de estanqueidade, durante a execução da obra (distribuição do material de cobertura e compactação, etc) e durante a vida útil da obra (tensão devido à ancoragem, enchimento e esvaziamento do reservatório, etc). É importante uma análise das características mecânicas requeridas do geossintético na fase de execução da obra, para qualquer que seja a função a ser desempenhada pelo geossintético.

Para facilitar a visualização, apresentam-se na Figura 2.2 os ensaios para avaliação do comportamento mecânico dos geossintéticos. Alguns destes ensaios já estão normalizados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e por outras instituições.

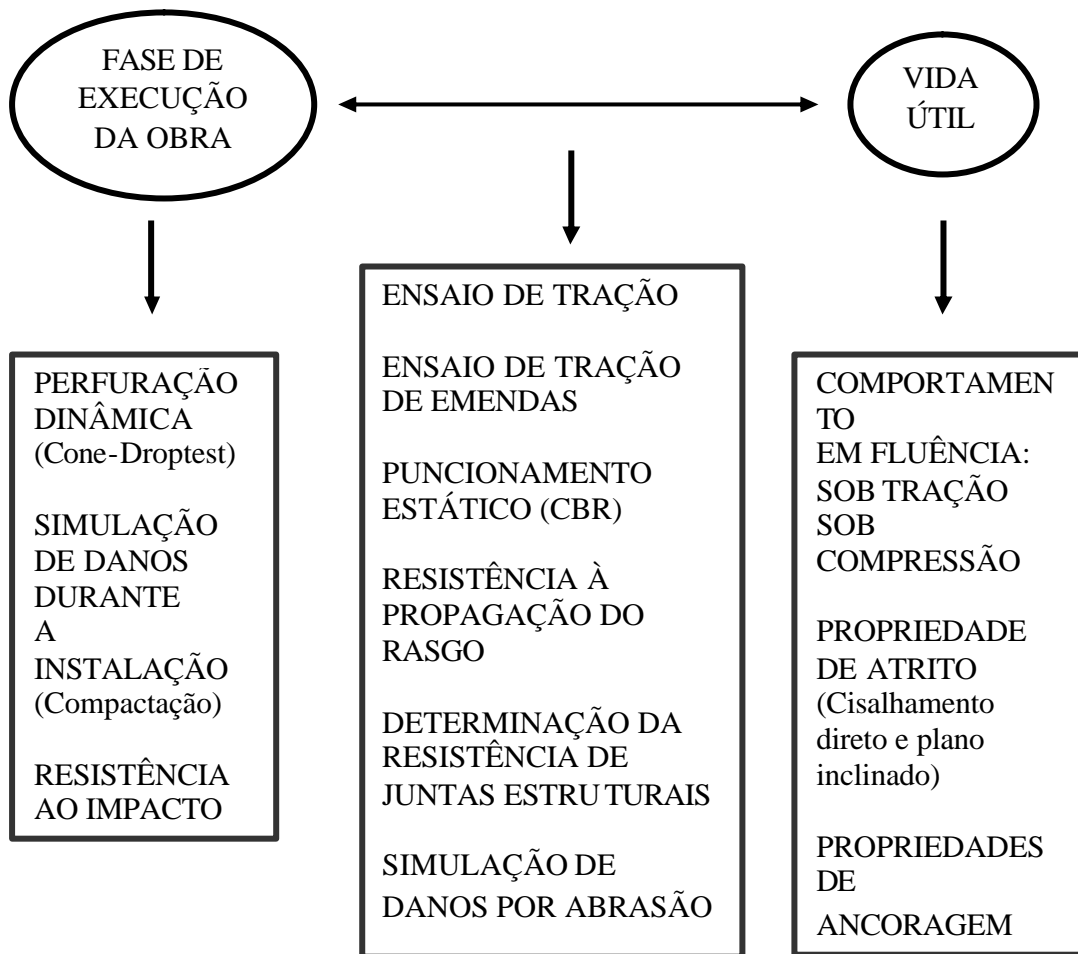


Figura 2.2 - Fluxograma representativo dos ensaios para avaliação do comportamento mecânico em geossintéticos (Vidal, 1992).

Dependendo do tipo de aplicação, são também considerados ensaios de avaliação da resistência à fadiga, para a manutenção das propriedades de resistência à tração e de compressibilidade ao longo do tempo.

Alguns ensaios de avaliação da resistência à tração sob condições bi e tridimensionais vêm sendo realizados, ainda que não normalizados. O ensaio para determinar a resistência à tração sob confinamento é muito importante, sobretudo no caso dos geotêxteis não tecidos (McGown et al, 1984).

Existem várias normas específicas para determinação de propriedades mecânicas das geomembranas. Além das características de resistência à tração, ao rasgo, à fluência e ao puncionamento, pode-se citar a necessidade de ensaios de emendas (realizadas na indústria ou no campo) e outras formas de solicitação a que a geomembrana possa vir a ser submetida (estouro, tração multidirecional, entre outros).

2.1.3) PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

As propriedades físicas dos geossintéticos não fornecem diretamente parâmetros de projeto. Estas propriedades são utilizadas para a identificação rápida do produto no campo, sendo também de interesse em pesquisas (Vidal, 1991).

a) Propriedades físicas dos geotêxteis

Os geotêxteis apresentam como propriedades físicas importantes a gramatura, a espessura e a porosidade.

A *gramatura* ou *massa surfácica* (M_A , g/m^2) é um dos parâmetros mais utilizados para a caracterização dos geotêxteis não-tecidos, sendo definida como a massa por unidade de área;

A *espessura* (t_{GT} , mm) corresponde à distância entre duas superfícies rígidas paralelas que comprimem a amostra do geotêxtil a níveis de carga preestabelecidos (Vidal, 1991):

- Sobrecarga de 2kPa para medida de identificação: O valor obtido é denominado espessura nominal;
- Sobrecarga de 20kPa e/ou 200kPa, na tentativa de aproximar-se mais das condições de campo.

A porosidade (n_{GT}) é determinada, em função da gramatura (M_A) e da espessura do geotêxtil (t_{GT}), da densidade da fibra/filamento (ρ_f), e da massa específica da água (γ_a) sendo dada pela expressão:

$$n_{GT} = 1 - \frac{M_A}{t_{GT} \times \rho_f \times \gamma_a} \quad (2.1)$$

b) Propriedades físicas das geomembranas

As geomembranas apresentam como propriedades físicas a espessura, densidade e a massa por unidade de área.

São consideradas, para as geomembranas, dois tipos de espessura, a espessura nominal e a espessura funcional. A espessura nominal (t_{GM}) é definida como a espessura total da geomembrana, obtida pela mesma metodologia indicada para geotêxteis. A espessura funcional (t_{GM}') é a espessura efetiva das geomembranas, sendo a mais importante do ponto de vista geotécnico, pois funciona como condicionadora de processos de difusão. É de difícil determinação, pois deve-se identificar os pontos de espessura mínima ao longo da manta (Vidal, 1998).

A densidade da geomembrana depende do tipo de polímero que a constitui, sendo que os valores de densidade dos polímeros mais comuns estão no intervalo de 0.85 a 1.5 g/cm³ (Koerner, 1994).

c) Propriedades físicas de outros geossintéticos

De acordo com as suas características, os demais geossintéticos (ou geocompostos) apresentam as seguintes características/propriedades físicas (Koerner, 1994):

Geocompostos argilosos (“GCL’s”)– Tipo de argila; espessura; massa por unidade de área; tipo de mecanismo utilizado para unir os grãos de argila entre si e ao geotêxtil ou à geomembrana adjacente; propriedades dos materiais que são associados à bentonita, tais como geotêxteis, geomembranas e teor de umidade;

Geogrelha – Tipo de estrutura, tipo de junção, tamanho de abertura, espessura, massa por unidade de área, porcentagem de área aberta e rigidez;

Georredes – Porcentagem de área aberta, espessura, tamanho e forma das aberturas, cor, dureza, massa por unidade de área, entre outros;

Geotubos – Espessura da parede, diâmetro do tubo e densidade.

2.2) EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO USO DE GEOSSINTÉTICOS EM GEOTECNIA

A nível internacional, a utilização de geossintéticos em Geotecnia antecede às três últimas décadas. A utilização de inclusões nos solos para melhoria de suas propriedades já era do conhecimento de povos da antiguidade.

Segundo Palmeira (1992), as muralhas de Ziggurat de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 AC), foram construídas utilizando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Partes da muralha da China foram também construídas com inclusões de mantas de raízes. Os Incas utilizavam lã misturadas ao solo na construção de estradas que resistem ao tempo até os dias de hoje (por exemplo, “Templo de La Luna”, no Peru). Observa-se, também, a aplicação de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles, antes da construção de aterros, no interior do Brasil e em outros países. Mantas de algodão foram utilizadas, no ano de 1926, pelo Departamento de Estradas da Carolina do Sul (USA) como reforço de camadas asfálticas em pavimentos. Acredita-se que esta é a aplicação pioneira que mais se assemelha a alguns geossintéticos atuais.

Por volta dos anos 60 a técnica de reforço de solos por inclusões se acelerou, por intermédio do engenheiro francês Henri Vidal, com a utilização de tiras metálicas como elementos de reforço em aterros (“Terra Armada”). A Figura 2.3 apresenta uma cronologia aproximada do aparecimento dos geossintéticos nas últimas décadas.

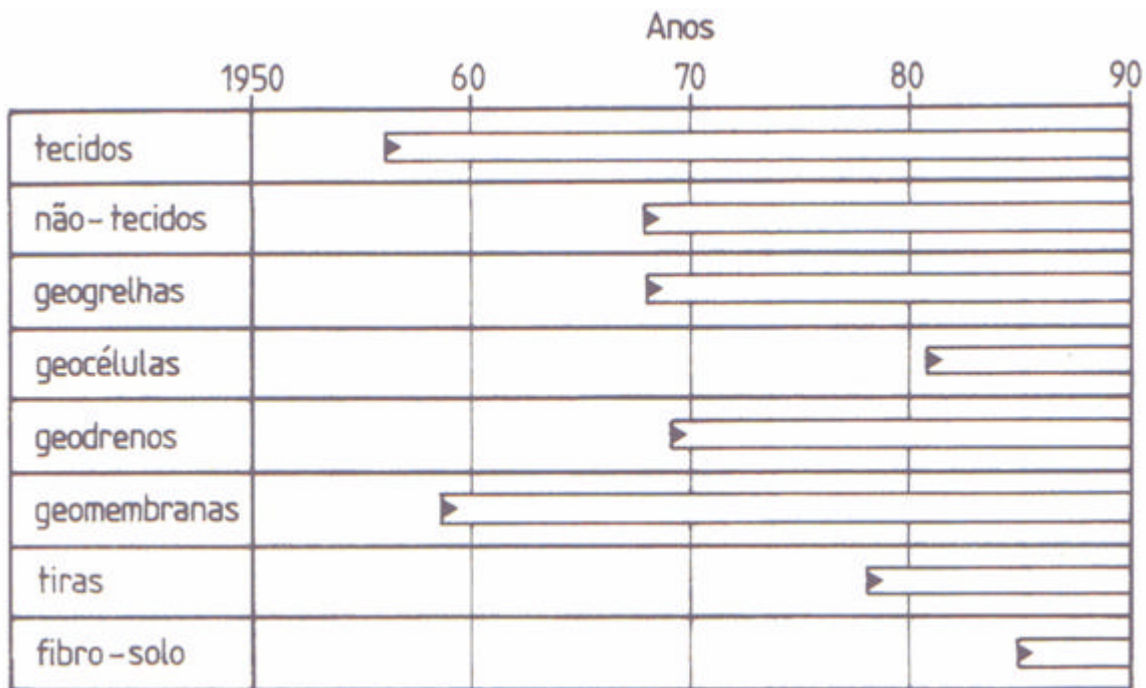


Figura 2.3 – Cronologia do aparecimento dos geossintéticos (Palmeira, 1992).

Sabe-se que a utilização de materiais compostos de fibras naturais como inclusões é limitada por razões de degradabilidade. A possibilidade de níveis de corrosão indesejados e os tratamentos necessários para materiais metálicos, ou a utilização de metais mais nobres podem inviabilizar economicamente a utilização de inclusões metálicas. Não raramente, o substituto plástico é associado a baixa qualidade, quer seja por resistência mecânica insatisfatória, por elevada deformabilidade ou durabilidade limitada. Com aprimoramento da qualidade desses materiais tal realidade tem mudado consideravelmente.

Segundo Palmeira (1992), os avanços tecnológicos na utilização de plásticos na engenharia surgiram principalmente devido às necessidades das indústrias aeronáuticas e automobilísticas. Pode-se citar como exemplo, o Kevlar, um tipo de plástico que é capaz de apresentar resistência à tração até 5 vezes superior a do aço e com valor de módulo de deformação entre os valores apresentados pelo alumínio e pelo aço. Este material tem sido muito utilizado como elementos estruturais em aeronaves, plataformas de prospecção de petróleo “offshore”, carros de corrida, etc.

Na construção civil, os materiais sintéticos foram aceitos mais lentamente. Crê-se que os pioneiros na utilização de geossintéticos de geração mais recente em Geotecnia foram provavelmente os americanos e holandeses, na década de 50 (John, 1987). Indústrias têxteis e companhias petroquímicas foram as principais responsáveis pela fabricação dos primeiros geossintéticos. Atualmente tais indústrias ainda respondem por parte significativa dos geossintéticos produzidos no mundo.

Pode-se citar algumas razões que levaram ao crescimento de utilização de geossintéticos:

- ◆ Melhoria das características físicas e mecânicas dos elementos sintéticos relevantes para obras geotécnicas;
- ◆ Razões ambientais, escassez ou esgotamento de jazidas de materiais naturais;
- ◆ Melhoria do conhecimento do comportamento de geossintéticos e de obras com geossintéticos, a partir de resultados de pesquisas e observações de obras reais;
- ◆ Facilidade de execução da obra. Fácil instalação dos geossintéticos, sendo que na maioria das aplicações não é requerida mão-de-obra especializada;
- ◆ Menor tempo de execução da obra.

A partir do momento em que ocorre a combinação dos fatores acima, pode-se observar um custo menor da obra com geossintético, em comparação com soluções convencionais. Observa-se que em poucas áreas da Geotecnia houve uma interação tão intensa entre indústrias, centros de pesquisa e universidades, com o objetivo comum de pesquisar um material. Segundo Palmeira (1992), nos países desenvolvidos, algumas empresas fabricantes de geossintéticos financiam pesquisas sobre o assunto dentro das universidades. Na Inglaterra, por exemplo, na década de 80 uma empresa de geogrelha financiou atividades de pesquisa por vários anos em 5 grandes universidades (Oxford, Leeds, Nottingham, Sheffield e Strathclyde), visando à melhoria do conhecimento do comportamento de geogrelhas. O Geosynthetic Research Institute, na

Universidade de Drexel, USA, sob a chefia do Prof. R. Koerner, é financiado por cerca de 20 diferentes fabricantes de geossintéticos. Universidades e institutos de pesquisas brasileiros também têm trabalhado junto com empresas nacionais de geossintéticos com o mesmo objetivo.

2.3) EVOLUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

Giroud (1990), citado por Palmeira (1992), dividiu a utilização de geossintéticos em Geotecnia entre os períodos de 1960 a 1975 e de 1975 a 1990. Segundo Giroud, no primeiro período, os engenheiros geotécnicos usaram os geossintéticos disponíveis no mercado. Já no segundo período, os fabricantes de geossintéticos procuraram desenvolver produtos para atender às reais necessidades do engenheiro geotécnico. Observa-se que ocorreu realmente uma melhoria na qualidade dos produtos. Atualmente, por exemplo, existe uma maior confiabilidade nos geossintéticos em vários aspectos, devido às muitas pesquisas realizadas com esses materiais, inclusive dentro das próprias indústrias.

Existem algumas propriedades dos geossintéticos que devem ser consideradas pelos engenheiros geotécnicos quando da utilização desses materiais:

- Resistência: Muitos geossintéticos possuem resistência compatível com a maioria das aplicações;
- Rigidez à tração: Não tem sido problema para obras correntes sem restrições severas a deformações do maciço. Atualmente sabe-se que a rigidez à tração de alguns geossintéticos (geotêxtil não-tecido), obtido em isolamento no laboratório, podem aumentar mais de 3 vezes quando os mesmos estão enterrados (Azambuja, 1995).
- Fluência: Usualmente essa propriedade não é comprometida no que se refere ao desempenho da maioria dos geossintéticos quando aplicados às obras de engenharia ambiental. Mesmo os mais susceptíveis à fluência em geral podem ser utilizados na maioria dos casos, desde que os seus comportamentos à fluência sejam bem conhecidos e

se escolha um fator de redução para o esforço de tração mobilizada compatível com as características da obra (McGown et al., 1984).

- Durabilidade: Já existem observações de obras reais por longos períodos de tempo sem terem sido constatados problemas relevantes sob condições normais quando aspectos de degradação do geossintético são considerados (Palmeira, 1998).

Segundo Palmeira (1998), é importante observar que o engenheiro geotécnico só adquirirá confiança na utilização de um determinado produto, caso dados relevantes sobre o mesmo estejam disponíveis. Por isso, a qualidade do catálogo do referido produto assume grande importância. Quanto maior o número de dados resultante de testes, pesquisas e comprovações experimentais, melhor será para o fabricante do geossintético e para o usuário. Os catálogos devem ser bastante claros sobre as limitações do produto, pois não existe nenhum material de construção que não possua limitações. Infelizmente, poucos são os catálogos que fornecem um número razoável de informações, embora grandes progressos venham sendo observados nos últimos anos, inclusive no Brasil.

O geossintético deve ser escolhido para uma ou mais finalidades em função de suas características e com base em métodos de projetos sólidos existentes na literatura técnica. A utilização do mesmo sem critérios pode trazer prejuízos para o usuário e para o fabricante que incentive tal procedimento. Alguns equívocos são primários como o caso de alguém que deseje utilizar barras de aço em estruturas de concreto armado, sem se preocupar com o tipo de aço a utilizar, diâmetro de barra ou mesmo em que posição colocá-la na estrutura. Um exemplo comum é a utilização de um geotêxtil como filtro sem serem verificados critérios de filtro, que levam em conta as características desse e do solo na vizinhança da intervenção. Assim, não parece redundante enfatizar que um geossintético deve ser escolhido em função de critérios técnicos.

2.4) DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS FACE AO MEIO AMBIENTE

A garantia da manutenção das características admitidas no projeto de engenharia, frente aos ataques provocados pelo meio ambiente, é ponto fundamental em qualquer aplicação. Os geossintéticos tradicionais, com raras exceções, não têm apresentado problemas consideráveis nas obras onde o material disposto é enterrado no solo. Entretanto, sua aplicação em obras de proteção ao meio ambiente, sobretudo em reservatórios ou barragens de rejeitos industriais ou de mineração e em obras de disposição de lixo, vem colocando esses produtos em situações de grande risco. É necessário o estudo de diversos mecanismos de ataque para que se possa compreender o problema, para posteriormente eliminá-lo ou minimizá-lo.

Atualmente, existem inúmeras tentativas de simular os ataques agressivos, verificando-se suas conseqüências nas propriedades mecânicas, hidráulicas e físicas nos materiais sintéticos. Existem algumas propostas de normas para análise da resistência destes materiais à oxidação térmica, enterramento, degradação química e degradação biológica.

Segundo Koerner et al. (1990), o comportamento dos geossintéticos, no que se refere ao comportamento a longo prazo, é condicionado pelo processo de fabricação e também pelo tipo de polímero constituinte. O tipo de polímero influencia a resistência do geossintético aos mecanismos de degradação por raios ultravioletas, resistência à temperatura, hidrólise, degradação química e biológica, e também as propriedades mecânicas, como por exemplo, resistência a danos de instalação, entre outras.

2.5) APLICAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL

A contaminação dos solos, aquíferos e lençóis freáticos são os principais problemas enfrentados pela engenharia geotécnica na área de proteção ao meio ambiente. Existem diversas discussões a respeito desse assunto. As contaminações por hidrocarbonetos derivados do petróleo em solo geram alterações geoquímicas e bioquímicas que são catalisadas a partir da inserção deste fluido agressivo no subsolo.

Os vazamentos em postos de abastecimento de combustíveis constituem fontes expressivas, não só pelo volume do fluido agressivo, mas também pelo caráter sistêmico que representam e pela repercussão que geram sobre a qualidade dos aquíferos. Deve-se entender a dinâmica dessas contaminações para que sejam orientadas as atividades de prospecção e diagnóstico dos impactos gerados pelos vazamentos desses combustíveis, bem como para desenvolver técnicas de remediação econômica e ambientalmente adequadas. No entanto, todas estas colocações podem ser evitadas caso sejam aplicados corretos sistemas de proteção do solo.

Existe também a aplicação de geossintéticos em obras com resíduos perigosos. Azambuja et. al. (2001) apresenta a utilização desses materiais em sistemas de encapsulamento de resíduos industriais perigosos, além de um sistema de invólucro de compósito de concreto e fibras poliméricas, cujo sistema é envolvido por um *liner* de geomembrana de polietileno de alta densidade. Percebe-se que a aplicação de materiais sintéticos na área de proteção ambiental tem aumentado bastante, porém existem muitos sistemas inadequados em operação.

A utilização de geossintético nesses tipos de obras tem sido cada vez mais adequada, porém são necessárias mais pesquisas a respeito do comportamento desses materiais sintéticos quando em contato com fluidos agressivos, levando-se em consideração as propriedades intrínsecas do fluido agressivo, a temperatura do meio, o tempo de contato com o fluido e as solicitações mecânicas que também auxiliam na degradação do material sintético.

2.6) PESQUISAS SOBRE A DURABILIDADE E DEGRADAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Nos eventos científicos realizados até o momento no Brasil sobre geossintéticos, foram publicados alguns importantes trabalhos sobre durabilidade. Sabe-se que um dos primeiros artigos versando sobre tipos de geossintéticos e a evolução de suas aplicações foi o de Palmeira (1992), no Geossintéticos'92. Posteriormente, Pandolpho & Guimarães, Vidal & Padilha e Abramento, em 1995, escreveram sobre durabilidade e desempenho dos geossintéticos.

Rosa (1996) afirma que os materiais poliméricos apresentam uma gama de propriedades e em muitas aplicações estão sujeitos a intemperismos. Contudo, como os ensaios de ação do intemperismo se baseiam em causa e efeito, por vezes não é fácil identificar essa causa, uma vez que ela está ligada ao meio onde o material está inserido, requerendo também um conhecimento adequado das características intrínsecas do material.

Brand et al. (1991) e Grubb et al. (2000) afirmam que a perda de resistência de materiais sintéticos cresce com a intensidade da radiação solar, com a temperatura e com o tempo de exposição, condições essas que dependem da latitude e da estação do ano. Ou seja, é importante levar em consideração as condições a que os geossintéticos estarão sujeitos nas obras de engenharia e quais solicitações atuarão sobre esses materiais.

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.

Matheus (2002) ainda apresenta um estudo sobre envelhecimento acelerado e dano induzido no desempenho e durabilidade de alguns geossintéticos. A pesquisa concluiu que, para os ensaios de envelhecimento por aplicação de radiação ultravioleta, numa exposição de até 3800 horas de ensaio, alguns tipos de geossintéticos não tinham perdido resistência à tração. Entretanto, no caso de envelhecimento térmico, esses materiais apresentaram uma redução de resistência de aproximadamente 11%. Esses resultados confirmam a necessidade de pesquisas a respeito do comportamento dos geossintéticos quando submetidos a variadas temperaturas.

Sabe-se que alguns geossintéticos podem ser submetidos a altas temperaturas como, por exemplo, nas aplicações rodoviárias onde ocorre o contato com asfalto muito quente. Nesses casos podem ocorrer mudanças de comportamento e nas propriedades mecânicas desses materiais ao longo do tempo, principalmente na relação carga-deformação. Segundo Abramento (1995), se o material

for exposto ao calor por um longo período de tempo, suas propriedades físicas podem ficar comprometidas. Artieres et al. (1997) afirmam que, em aterros sanitários, a temperatura do chorume pode chegar a 50°C próximo à geomembrana, tendo sido reportado pela literatura a medição de até 80°C.

Observa-se que esse assunto ainda é pouco estudado, provavelmente, pela falta de conhecimento dos estudiosos de engenharia geotécnica, a respeito dos polímeros que constituem os geossintéticos. Informações sobre as propriedades dos polímeros são primordiais para o posicionamento dos pesquisadores quanto à durabilidade dos geossintéticos. Não basta somente conhecer os geossintéticos, mas faz-se necessário entender as inúmeras reações que ocorrem quando estes materiais entram em contato com um meio contaminado ou não.

2.7) DEGRADAÇÃO QUÍMICA NOS GEOSSINTÉTICOS

A degradação química compreende toda transformação dos polímeros constituintes dos geossintéticos mediante a ação de substâncias quimicamente ativas presentes no solo. É um processo mais intenso em polímero de mais baixo peso molecular, baixo percentual de cristalinidade, baixa densidade e fraca orientação (Jewell e Greenwood, 1988). Podem-se incorporar estabilizantes e antioxidantes à fabricação dos polímeros para melhorar a resistência à ação química, apesar de que alguns aditivos aceleram a degradação química se forem utilizados de maneira errônea.

Sabe-se que a temperatura, a umidade do solo, a agressividade química e o nível de tensões impostas podem acelerar ou retardar as reações geradas em materiais sintéticos. Muitas das reações atuam superficialmente e observa-se que o diâmetro dos filamentos e a espessura dos materiais sintéticos desempenham um papel importante nas propriedades de durabilidade de geossintéticos.

Segundo Azambuja (1995), dentre os processos de degradação química, pode-se citar:

Termo-oxidação: Surge em ambientes ligeiramente ácidos ou neutros e com temperaturas mais elevadas que favorecem a remoção de átomos de hidrogênio da cadeia polimérica. Não chega a ser significativo do ponto de vista de perda de resistência, mas é maior nas poliolefinas, em especial nos polipropilenos. Segundo estudos realizados, o maior efeito da oxidação não é a perda de resistência, mas a perda de ductilidade.

Foto-oxidação: É decorrente da ação de determinados espectros da radiação solar que ativa reações de remoção de hidrogênio. Geralmente, os aditivos são eficientes para exposições moderadas. Em casos especiais, em que a exposição é muito prolongada, o controle *in situ* das perdas de resistências torna-se necessário.

Hidrólise: É a reação inversa de esterificação e pode afetar sensivelmente as resistências das fibras de poliéster. Ambientes fortemente alcalinos ou de concentração salina podem provocar perdas superiores a 35% da resistência de fibras de PET, mas em ambientes neutros ou ligeiramente ácidos, essa reação dificilmente é ativada.

Trincamento por tensão (“Stress cracking”): É um mecanismo que costuma ocorrer exclusivamente na poliolefinas, em especial no polietileno. Consiste no crescimento de lesões e trincamento que só ocorrem em níveis expressivos de tensões associadas a ambientes agressivos.

Na Tabela 2.1 observam-se alguns fatores de redução para degradação química citados por Azambuja (1994).

Tabela 2.1 – Fatores de redução com respeito à degradação química, Azambuja (1994).

Função	Polímero	Fatores de Degradação Química (fq)
Temporária	Polipropileno	1-1,25
	Polietileno	1-1,25
	Poliéster	1-1,25
Permanente	Polipropileno	1,25-2,0
	Polietileno	1,1-1,50
	Poliéster	1,25-2,00

Nota.: Os valores mais altos referem-se aos ambientes muito desfavoráveis.

2.8) PRINCIPAIS SOLICITAÇÕES QUE PODEM OCORRER NAS GEOMEMBRANAS

As solicitações a que os geossintéticos podem estar submetidos podem ser divididas em dois tipos (Vidal, 1992):

Solicitações Mecânicas, as quais podem ocorrer nas seguintes situações:

- As geomembranas se dilatam com o calor;
- A perda de componentes da geomembrana no processo de envelhecimento pode provocar contração;
- Os pontos de fixação e os ângulos existentes em ancoragens ou contorno de estrutura em concreto provocam zonas de esforços localizados;
- Tração multiaxial pode ocorrer no caso de subsidência do solo de base, ou formação de gases sem drenagem sob a geomembrana;
- Puncionamento por objetos flutuantes em canais;
- Efeito das ondas e do vento sobrelevando a geomembrana.

Solicitações Físico-Químicas: As quais podem ocorrer nas seguintes situações:

- Degradação fotolítica de uma geomembrana não protegida;
- Perda de compostos solúveis;
- Degradação térmica;
- Oxidação do polímero.

Além das solicitações supracitadas, deve-se considerar que, para áreas de estocagem de rejeitos e aterros sanitários, ainda existem outras situações problemáticas nas quais os geossintéticos podem sofrer alterações indesejadas, como:

- Agressividade do percolado, com risco de degradação dos geossintéticos;
- Dispositivos complexos, com superposição de camadas;
- Temperaturas podendo subir a mais de 60 °C no interior de aterros sanitários muito altos e com sistemas drenantes mal projetados (Collins, 1993).

Segundo Vidal (1992), os fatores citados aumentam o nível das solicitações na qual o geossintético estará sendo submetido. Assim, deve-se levar em consideração alguns cuidados para minimizar estas solicitações.

- * Acompanhamento das propriedades mecânicas do material dos taludes e do aterro, buscando evitar grandes deformações, podendo-se reforçá-los com geotêxteis ou geogrelhas;
- * Proteção da geomembrana nos taludes, de modo a minimizar os esforços de tração ao longo do seu comprimento e no trecho de ancoragem;
- * Sistema drenante eficaz que conduza rapidamente o percolado, minimizando a pressão e o tempo de contato (existem alguns trabalhos que vêm alertando sobre incrustações em drenos de aterros sanitários, p. ex., Brune et al., 1991);
- * Avaliação criteriosa dos parâmetros de interface e de comportamento dos elementos de cada camada;

* Proteção da geomembrana contra puncionamento evitando, sobretudo, a colocação ou a presença de materiais angulares diretamente sobre a mesma;

* Avaliar as características de comportamento das geomembranas levando-se em conta as condições ambientais de temperatura e de agressividade química.

2.9) CAPACIDADE DE SOBREVIVÊNCIA DOS GEOSSINTÉTICOS

Segundo Azambuja (1994), a capacidade de sobrevivência dos geossintéticos é o termo empregado para definir a resistência que um geossintético possui diante dos esforços induzidos pela construção e operação inicial do sistema ao qual este material é destinado. Esta definição, inicialmente específica dos geotêxteis, deve-se à prática americana (Christopher e Holtz, 1985), que classificaram as mantas em categorias de baixa, moderada e alta capacidade de sobrevivência, de acordo com as respectivas características estruturais e de resistências mecânicas, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação simplificada da capacidade de sobrevivência dos geossintéticos (Azambuja, 1995).

Capacidade de sobrevivência	Geotêxteis	
	tecido	não tecido
Baixa	$M_A < 135\text{g/m}^2$	$M_A < 150\text{g/m}^2$
Moderada	$135 \leq M_A \leq 150\text{g/m}^2$	$150 \leq M_A \leq 300\text{g/m}^2$
Alta	$M_A \leq 150\text{g/m}^2$	$M_A > 300\text{g/m}^2$

Onde: M_A = gramatura.

A capacidade de sobrevivência também é influenciada pelas condições de instalação do geossintético, sendo função da espessura da camada de solo, granulometria, tipo de sub-leito e energia transmitida pelo equipamento de compactação.

Allen (1991), a posteriori, adaptou os critérios de capacidade de sobrevivência para as condições de instalação de sistemas de contenção em solo reforçado, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação da capacidade de sobrevivência requerida (Allen, 1991).

Tipo de equipamento	Aterro	Espessura da camada do aterro		
		< 15cm	15 a 30cm	> 30cm
Leve e rebocado	Areia fina a grossa, grãos sub-arredondados	Baixa	Baixa	Baixa
	Areia e cascalho grad., grãos sub-ang., $\phi < 75\text{mm}$	Moderada	Baixa	Baixa
	Cascalho mal grad., grãos angulosos, $\phi > 75\text{ mm}$	Muito alta	Alta	Moderada
Auto propélido	Areia fina a grossa, grãos sub-arredondados	Moderada	Baixa	Baixa
	Areia e cascalho grad., grãos sub-ang., $\phi < 75\text{ mm}$	Alta	Moderada	Baixa
	Cascalho mal grad., grãos angulosos, $\phi > 75\text{ mm}$	Não recomendada	Muito alta	Alta

Muitos estudos demonstram preocupação a respeito do dano mecânico nos materiais sintéticos. No entanto, observa-se que muitos dos experimentos de campo não foram realizados em condições de instalação controladas.

Segundo Azambuja (1995) foram realizados programas experimentais, nos quais foram possíveis gerenciar e registrar as condições de instalação dos geossintéticos, facilitando a sistematização destas informações. Alguns desses trabalhos correlacionam o dano com perda de resistência em curto prazo, a partir de resultados obtidos em ensaios de Resistência à Tração de faixa larga não confinados. Alguns ensaios foram realizados em amostras exumadas de obras, de camadas experimentais ou de dispositivos para danos construídos em laboratório, e os resultados comparados aos obtidos em ensaios com amostras virgens.

Usualmente, determina-se o fator de redução por dano mecânico (f_d) por meio da razão entre as resistências de curto prazo da amostra virgem e da amostra exumada. Azambuja (1994), baseado em alguns trabalhos experimentais, apresenta um intervalo de fatores de redução (Tabela 2.4), onde valores mínimos e máximos são recomendados. Para calcular a resistência admissível do reforço, o nível de informações sobre as condições de instalação servirá de base para o julgamento do fator de redução mais adequado dentro desse intervalo.

Rainey e Barksdale (1993) e Koerner e Koerner (1990), consideram inaceitável uma perda de resistência superior a 50%. Os autores explicam que não há necessidade de expor um reforço ao dano demasiado, uma vez que se faz possível gerenciar as condições de instalação pela escolha dos materiais de aterro ou pela metodologia construtiva adequada.

Tabela 2.4 – Intervalo de fatores de redução por dano mecânico para geotêxteis sugeridos na literatura (Azambuja, 1997).

Geotêxtil	Capacidade de sobrevivência	Capacidade de sobrevivência requerida			
		Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
Tecido de prolipropileno	Baixa	1.30-1.45	1.40-2.0	NR	NR
	Moderada	1.20-1.35	1.30-1.80	NR	NR
	Alta	1.10-1.30	1.20-1.70	1.60-NR	NR
Tecido de poliéster	Alta	1.10-1.40	1.20-1.70	1.50-NR	NR
Não tecido de poliéster	Baixa	1.15-1.40	1.25-1.70	NR	NR
	Moderada	1.10-1.40	1.20-1.50	NR	NR
	Alta	1.05-1.20	1.10-1.40	1.35-1.85	NR

Nota: NR = Valor considerado superior a 50% de perda de resistência.

Segundo Azambuja (1994), alguns autores pesquisaram a influência do dano mecânico sobre a rigidez não confinada dos geotêxteis (Bush, 1988; Rainey e Barksdale, 1993; Viezee et al, 1990). A maioria desses estudos mostra que a rigidez secante para deformações menores do que 5%, pelo menos para amostras pouco danificadas (Troost e Ploeg, 1990), é aumentada, possivelmente devido a um encruamento na estrutura das fibras (Biling et al., 1990).

2.10) DANOS NOS GEOSSINTÉTICOS CAUSADOS NA INSTALAÇÃO

Os principais danos causados na instalação ocorrem muitas vezes na compactação do solo sobre o geossintético, descuidos despercebidos na própria instalação, além do tráfego de equipamentos pesados e o contato brusco com objetos pesados (Elias, 1990). Os principais fatores que afetam a intensidade do dano são o tipo de geossintético e o espaçamento entre as camadas de geossintético e o material de aterro.

Koerner (1992) apresenta alguns resultados de ensaios realizados sobre amostras danificadas e virgens, concluindo que sempre ocorre redução na resistência devido a danos na instalação do geossintético, sendo tal redução bastante variável. Esse autor sugere que se use um fator de redução para o dano de instalação em geral entre 1,0 e 2,0, podendo chegar a 3,0 em alguns casos extremos.

Watts e Brady (1990) reproduziram danos de instalação em laboratório por meio de vibrocompactação de pedregulho calcáreo bem graduado sobre amostras de geotêxteis (PP, PET e PET/PA), geocomposto de PET/PE e geogrelha de PET e PEAD. Os fatores de redução obtidos a partir dos resultados de ensaios de resistência à tração situaram-se entre 1,0 e 1,7, exceto para o geotêxtil de PET, em que os valores foram mais elevados, variando 1,6 a 3,8.

Algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de quantificar os valores requeridos para o fator de redução contra o dano mecânico, procurando relacionar a perda de resistência do geossintético com a agressividade do ambiente de instalação e utilizando o conceito da capacidade de sobrevivência do material sintético. Existem outras formas de analisar esse tipo de dano, podendo-se citar ensaios de laboratório que estabeleçam critérios de inspeção visual em amostras exumadas das estruturas, correlacionando o número de furos ou lesões existentes com a resistência remanescente dos reforços. Para obter estes resultados podem ser executados ensaios de tração não confinados, podendo ser de faixa larga ou estreita, dependendo das condições e disponibilidade da quantidade de amostras.

2.11) INSPEÇÃO VISUAL NOS GEOSSINTÉTICOS DEGRADADOS

A inspeção visual dos danos em amostras exumadas é um critério útil para a aceitação de uma determinada metodologia construtiva. No entanto, não há referências suficientes para adotar-se um critério de inspeção com essa finalidade. Koerner (1990) propôs uma avaliação do dano mecânico em geotêxteis pela frequência de furos com diâmetro superior a 6mm. Todavia, os autores não obtiveram uma boa correlação entre a perda de resistência e o número de furos. Segundo Azambuja (1994), isto ocorreu provavelmente porque os mesmos agruparam diferentes tipos de geotêxteis no mesmo experimento.

Watts et al. (1990) desenvolveram estudos visando a classificação visual dos danos mecânicos, que são aplicáveis a geogrelhas e geotêxteis tecidos de estruturas mais simples. Nos trabalhos que tratam desta classificação não foram apresentadas tentativas de correlação entre frequência das lesões e a variação de resistência desses materiais sintéticos.

Azambuja (1994) desenvolveu um programa experimental sobre danos mecânicos em geotêxteis não tecidos de poliéster, associados com solos granulares grosseiros, nos quais sugerem-se critérios mais pormenorizados de inspeção visual dos danos de instalação. Este autor classificou as lesões como:

Cortes, que são admitidos com largura infinitesimal, sendo registrados os seus comprimentos;

Furos, que são relacionados segundo os seus diâmetros;

Contusões, que são lesões que provocam fortes distorções na estrutura das fibras, porém sem o vazamento do plano da manta.

Ao ocorrer à lesão ocorre o rompimento da continuidade dos filamentos e, com isto, surge a desestruturação das fibras. O grau de dano ocorrido pode ser avaliado por meio do somatório dos perímetros das lesões. Assim, pode-se quantificar o dano correlacionando o perímetro específico das lesões (U_d) com o somatório dos perímetros de todas as lesões observadas, e a área da amostra exumada do geotêxtil (Azambuja, 1994). A Tabela 2.5 mostra os critérios de classificação das lesões e os seus respectivos perímetros.

Tabela 2.5 – Tipologia e classificação das lesões em geotêxteis não tecidos (Azambuja,1994).

Tipo	Descrição	Dimensões	Perímetro da lesão
Contusão	Forte distorção mas sem orifícios	–	9.425mm
Corte	Orifício com forma alongada	$c < 5\text{mm}$	9.000mm
		$5 \leq c < 8\text{mm}$	13.000mm
		$c \geq 8\text{mm}$	Medido
Furo	Orifício com forma aproximadamente circular	$\varnothing < 2\text{mm}$	4.712mm
		$2 \leq \varnothing < 4\text{mm}$	9.425mm
		$4 \leq \varnothing < 6\text{mm}$	15.708mm
		$\varnothing \geq 6\text{mm}$	Medido

Nota.: “c” é o comprimento e “ \varnothing ” é o diâmetro médio.

A perda de resistência das amostras pode ser relacionada com o dano causado, de maneira que se pode adotar essa forma de análise em amostras exumada. Para aferir se os fatores de redução contra dano considerados em projeto são compatíveis com a prática construtiva adotada na obra. A Tabela 2.6 mostra um resumo dos dados obtido por Azambuja (1994).

Tabela 2.6 – Fatores de redução de danos mecânicos para geotêxteis não tecidos, (Azambuja,1994).

Classe de dano	Perímetro específico de dano	Fatores de redução (f_a)
Leve	0-2	1.00-1.25
Moderada	2-5	1.25-1.60
Intensa	5-13	1.40-1.90
Inadmissível	>13	NR

Nota: NR = Valor considerado superior a 50% de perda de resistência.

2.12) SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO COM GEOSSINTÉTICOS

Os sistemas de impermeabilização com geossintéticos são chamados de sistemas simples quando são constituídos por apenas uma camada impermeável, sendo esses sistemas empregados geralmente nos casos de contenção de materiais, onde os riscos de vazamentos eventuais não causarão danos significativos ao meio ambiente. Sabe-se que não existe material totalmente impermeável e estudos demonstram que, mesmo com o melhor controle de qualidade, podem-se observar imperfeições nas juntas e emendas, além de pequenos danos de instalação, no caso das geomembranas.

Nas camadas argilosas compactadas podem ocorrer fissuramentos e zonas de fluxo preferencial. Devido a esses aspectos, a maior parte dos países vem propondo, para a contenção de produtos tóxicos, a superposição de camadas impermeáveis, classificadas como:

Sistemas duplos: No caso de geomembranas espaçadas por georredes ou outro material drenante, com o objetivo de coletar e conduzir os fluidos ou gases que porventura ultrapassarem a camada impermeabilizante superior.

Sistemas compostos: Quando da superposição de uma geomembrana sobre uma camada argilosa compactada, supondo-se uma perfeita aderência entre a geomembrana e o solo.

Quando são utilizados sistemas de impermeabilização com geossintéticos para contenção de rejeitos sólidos que gerem percolato ou algum tipo de fluido ou gases tóxicos, devem-se considerar que esses percolados deverão ser conduzidos ao sistema de tratamento, o mais rápido possível, e nunca depositados diretamente no meio ambiente.

Em muitos países é obrigatória a colocação de geomembranas sob os sistemas drenantes inferiores, que possuem como função principal garantir a condução dos percolados. Nos sistemas de impermeabilização deve existir o revestimento de toda superfície da fundação e as laterais da área de contenção, além de um sistema de cobertura, que tem o objetivo de coletar e facilitar a

condução dos gases, impedindo infiltração de água de chuva e reduzindo o volume dos percolados que posteriormente deverão ser tratados.

2.13) RECOMENDAÇÕES INTERNACIONAIS QUE TRATAM A RESPEITO DA UTILIZAÇÃO DOS GEOSINTÉTICOS EM OBRAS COM REJEITOS PERIGOSOS

Sabe-se que a função primordial das geomembranas é gerar uma camada de baixíssima permeabilidade, com o objetivo de controlar a percolação e fluxo de líquidos ou gases. O uso destes materiais em todo o mundo tem aumentado muito nos últimos anos. Segundo Pohl (1992), esse crescimento de utilização se deve a novas regulamentações ambientais, à maior distribuição de dados e informações sobre as propriedades e eficácia das geomembranas, assim como ao desenvolvimento de métodos de controle de qualidade na produção e instalação das mesmas.

Na França, a camada de base do revestimento de fundo de uma área de disposição de resíduos deve possuir, pelo menos, 5m de espessura, com permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s, sendo denominada camada de estanqueidade passiva (Militon, 1993).

O sistema americano prevê para os resíduos da classe II, 0,92m de argila também com a permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s. No caso de rejeitos pertencentes à classe I, recomenda-se adicionar uma camada impermeável e uma camada drenante, ambas sintéticas. Na Alemanha, as espessuras de solo compactado são de 0,75m para resíduos da classe II e 1,5m para resíduos da classe I, com uma permeabilidade menor que 5×10^{-10} m/s (Vidal, 1992).

Sabe-se que as legislações americana e alemã recomendam uma atenção especial no contato entre a geomembrana e a camada de argila nas obras ambientais, de maneira que sejam reduzidas as fugas de fluidos que podem surgir em eventuais defeitos no material sintético. No Brasil, por enquanto, ainda não existem recomendações nacionais, porém vários órgãos ambientais já recomendam utilizar uma barreira polimérica quando da contenção de rejeitos perigosos.

O conceito de estanqueidade ativa baseia-se no princípio de que a geomembrana tenha por função principal barrar e facilitar a coleta do percolado, ajudando a sua condução ao sistema de drenagem.

De acordo com Vidal (1992), um sistema de estanqueidade de fundo é composto geralmente por:

- Um filtro em material com granulometria evoluindo da sub-superfície até a interface com a camada drenante, ou um filtro sintético com propriedades equivalentes;
- Uma camada drenante com elevado coeficiente de permeabilidade que, nos casos de dupla estanqueidade, é em geral, uma georrede;
- Uma geomembrana, geralmente protegida por um geotêxtil contra danos ou tração excessiva.

O revestimento de cobertura da área de disposição é geralmente composto por:

- Uma camada de solo vegetal permitindo a existência de uma cobertura vegetal que evite a erosão;
- Uma camada drenante para recolher e conduzir a água que se infiltre pela camada vegetal;

2.14) DEGRADAÇÃO E ESTABILIDADE TÉRMICA DOS POLÍMEROS

Os polímeros naturais e sintéticos apresentam certa instabilidade química sob a ação de determinados agentes, como por exemplo: radiações gama, infravermelha, ultravioleta, etc.

Segundo Lucas et al. (2001), os polímeros quando submetidos a um tratamento térmico podem apresentar mudanças estruturais caracterizadas por ruptura de ligações químicas nas cadeias principais e laterais.

A resistência térmica dos materiais poliméricos é influenciada por diversos fatores, os quais podem ser classificados como químicos e físicos. Os fatores químicos estão relacionados a: forças de ligação primária, secundária ou de Van der Waals e ligações hidrogênio, mecanismo de clivagem da ligação, simetria molecular (regularidade da estrutura), rigidez da estrutura intramolecular e grau de ligações cruzadas. Os físicos estão relacionados com: massa molar e

distribuição de massa molar, empacotamento molecular (cristalinidade), interações moleculares (efeito dipolar) e pureza (Lucas et al., 2001).

Polímeros diferentes devem gerar produtos voláteis diferentes, em concentrações variadas, quando submetidos a determinadas variações de temperatura. As etapas químicas envolvidas na formação dos produtos voláteis podem diferir em natureza eletrônicas via radicais livres ou iônicas.

Dependendo dos tipos de produtos voláteis gerados, os materiais poliméricos podem ser classificados em polímeros que: despolimerizam, não despolimerizam e aqueles que sofrem reações intra- intermoleculares.

Polímeros que despolimerizam: Neste processo ocorre a clivagem aleatória da cadeia, seguida de despolimerização. Ocorre o rendimento elevado de monômeros nos produtos de degradação e decréscimo lento na massa molar do polímero.

Polímeros que não despolimerizam: A degradação neste caso ocorre por meio da clivagem aleatória da cadeia, seguida por outras clivagens ao acaso, que levam a uma produção de monômeros baixa e a um rápido decréscimo na massa molar.

As produções de polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno de baixa densidade (PEBD), possuem baixos custos e estes materiais são quimicamente inertes. A estabilidade térmica do polietileno (PE) está relacionada ao grau e natureza das ramificações da cadeia polimérica.

Enquanto que polietileno e polipropileno (PP) são polímeros termicamente mais estáveis que seus respectivos éteres, ou seja, a introdução de oxigênio na cadeia hidrocarbônica do polímero reduz a estabilidade térmica, porque a ligação C-O é mais fraca que a ligação C-C. Assim, pode-se dizer que a estabilidade térmica pode ser estabelecida da seguinte forma: PP < PE.

Polímeros que sofrem reações intra e intermoleculares: A reação neste caso é intramolecular, seguida por uma reação de reticulação e clivagem aleatória da cadeia com geração de alto teor de

voláteis. Pode-se exemplificar citando-se o poli (cloreto de vinila-PVC), polímero presente em algumas geomembranas.

A taxa de formação do HCl no PVC é muito dependente das condições nas quais esse polímero está exposto. Algumas discordâncias existentes sobre o mecanismo dessa reação devem-se ao fato de que polímeros preparados em condições diferentes foram estudados sob condições experimentais de degradação diferentes e gerarão resultados também diferentes. Por isso, há a necessidade de formular normas específicas para os geossintéticos quando submetidos à degradação química, envolvendo acréscimo ou decréscimo de temperatura.

Geralmente, a decomposição ocorre por meio de uma reação intramolecular que envolve deshidrohalogenação e formação de um polieno. Os produtos da degradação do PVC são o ácido clorídico e um resíduo altamente conjugado. Como mecanismo de decomposição são propostos tanto os moleculares como via radicais livres.

Faz-se necessário conhecer alguns aspectos importantes para analisar o mecanismo de degradação térmica nos materiais poliméricos:

- Variação de massa molar do polímero em função da temperatura e evolução do processo de degradação;
- Composição qualitativa e quantitativa dos produtos de degradação voláteis e não voláteis;
- Velocidades e energias de ativação do processo de degradação.

2.15) ANÁLISE TÉRMICA DOS MATERIAIS POLIMÉRICOS

A análise termogravimétrica pode ser usada simplesmente para determinar a temperatura de decomposição dos variados polímeros que constituem os materiais sintéticos. Essa análise tem por finalidade observar a estabilidade do polímero em relação aos seus componentes.

Sabe-se que, quanto menor a massa molar, maior é o número de terminais de cadeias e menor a estabilidade térmica. Todavia, essa estabilidade torna-se constante a partir de determinada massa

molar na amostra, quando o tamanho da cadeia já é grande o suficiente para tornar quase que desprezível a influência dos terminais da cadeia. O valor da massa molar é variável de polímero para polímero.

Os métodos de análise térmica medem variações de um determinado parâmetro ocorrido como uma função da temperatura, T, aquecimento ou resfriamento, assim, como uma função do tempo, t, a uma temperatura constante (modo isotérmico). As técnicas mais empregadas para os estudos termogravimétricos são:

- Termogravimetria (TG);
- Termogravimetria derivativa (DTG);
- Análise térmica diferencial (DTA);
- Calorimetria diferencial de varredura (DSC);
- Análise termomecânica (TMA);
- Análise termodinâmico-mecânica (DMTA);
- Análise termodielétrica (DETA).

Essas técnicas fornecem resultados na forma de curvas, as quais contêm as informações a respeito da variação do parâmetro medido. Nesta pesquisa foram utilizados os seguintes métodos: TG, DSC e TMA, para geotêxteis e geomembranas. A finalidade desses ensaios é agregar informações para identificar pontos de fragilidade das amostras. Por exemplo, se as amostras tornaram-se mais rígidas ou quebradiças, pode-se aferir que os projetos que utilizam estes materiais como barreira impermeabilizante, segundo condições semelhantes aos ensaios, estão comprometidos, pois serão mais susceptíveis a danos mecânicos e vazamentos.

2.15.1) TERMOGRAVIMETRIA (TG)

A Análise Termogravimétrica é definida como um processo contínuo que envolve a medida da variação de massa de uma amostra em função da temperatura (varredura de temperatura), ou do tempo a uma temperatura constante (modo isotérmico). Neste ensaio pode-se conhecer as

alterações que o processo de aquecimento provoca na massa das substâncias, com o acompanhamento de reações de desidratação, oxidação, combustão, decomposição, entre outras.

A amostra pode ser aquecida ou resfriada, a uma velocidade pré-determinada, ou pode ser mantida a uma temperatura fixa. O modo mais comum de operação na análise de sistemas poliméricos é o programa de aquecimento com aumento de temperatura na faixa de 5 a 10²C/min.

Segundo Canevarolo (2003), existem três Análises Termogravimétricas mais habitualmente utilizadas: TG semi-isotérmica, TG isotérmica e TG dinâmica. A TG isotérmica possibilita a aplicação de temperatura constante dentro da faixa de operação do equipamento, durante um tempo determinado. Na TG dinâmica, a amostra é submetida a uma variação de temperatura linear previamente determinada. Nesta pesquisa foi utilizada a TG dinâmica com a finalidade de observar a perda de massa das amostras para variadas temperaturas.

2.15.2) CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

Neste ensaio pode-se determinar a temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de cristalização (T_c) e temperatura de fusão (T_m) do material. São medidos os calores específico (C_p), de fusão (ΔH_f), cristalização (ΔH_c) e de reação (ΔH_r). Segundo Lucas et al. (2001) o valor da temperatura, na qual ocorre a transformação, obtida pela curva de análise térmica, e a resolução da análise dependem de fatores instrumentais e de fatores associados à amostra ensaiada e à referência, que é um recipiente vazio semelhante àquele onde a amostra a ser ensaiada é introduzida. A temperatura nesse recipiente (referência) serve de base para o recipiente com a amostra estudada. Ao longo do ensaio, estas diferenças de temperatura são arquivadas e posteriormente comparadas. A diferença entre estes valores representa o resultado final do ensaio.

Os fatores instrumentais mais significativos são a velocidade de variação de temperatura, o dispositivo que contém a amostra, o sensor de temperatura e a forma de registro dos resultados. O tamanho, forma de empacotamento e distribuição das partículas na amostra podem influenciar nos resultados, assim como a atmosfera em que está sendo realizado o ensaio. O ensaio de DSC

pode ainda determinar diagramas de fase, cinética de reação, reações de desidratação, calor de adsorção e reação, polimerização, calor de cristalização, fusão, sublimação, pureza do material, estabilidade térmica e resistência à oxidação.

A Figura 2.4 apresenta um modelo de curva observado no ensaio de DSC para amostras de polímeros. Cada pico representa uma informação a respeito da amostra ensaiada. Por exemplo, o primeiro pico representa o ponto de fusão da amostra. É importante salientar que o processo de degradação, segundo Lucas et al. (2001), pode ser endo ou exotérmico e depende do balanço global de absorção e liberação de calor das reações químicas que ocorrem durante esse processo de transformação.

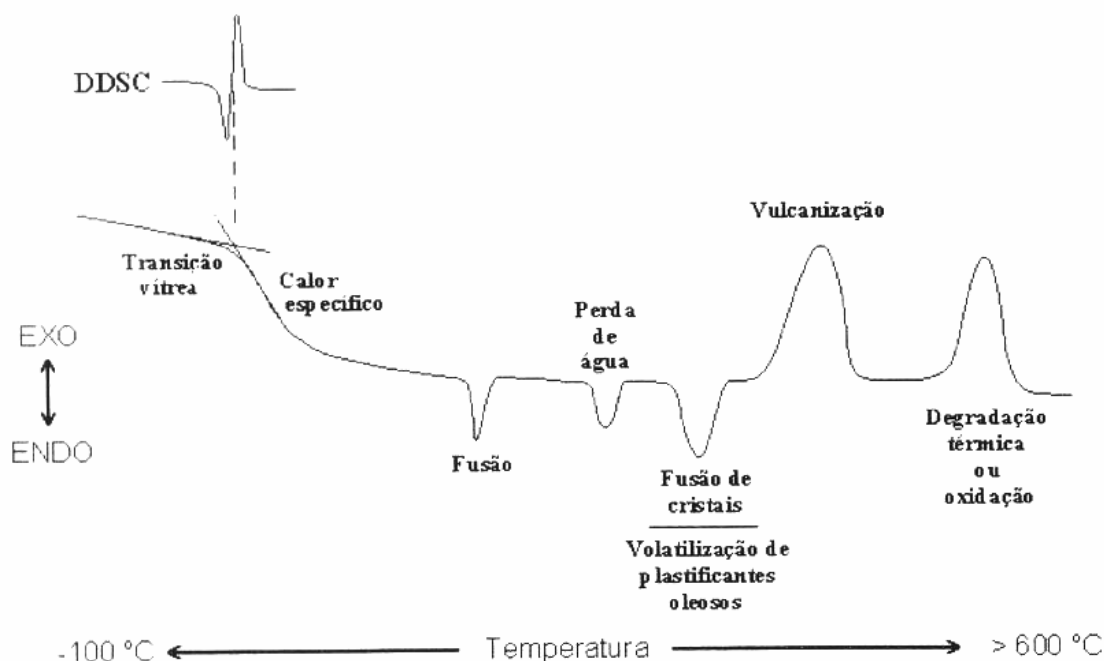


Figura 2.4 - Diagrama esquemático das informações típicas fornecidas pelo DSC para amostras de Polímeros (Lucas et al., 2001).

2.15.3) ANÁLISE TERMOMECAÂNICA (TMA)

Esta análise apresenta variadas formas de ensaio que dependem das necessidades do estudo. Existem alguns acessórios que podem ser adaptados à extremidade do eixo de deslocamento do

equipamento que determina o tipo de deformação da análise. Em função da informação desejada, diferentes acessórios podem ser adaptados à extremidade do eixo de deslocamento do equipamento, conforme Figura 2.5.

Para este ensaio os corpos de prova devem apresentar área superficial em torno de 8mm^2 e espessura próxima a 2mm , de acordo com a especificação do equipamento. Essas dimensões podem ser alcançadas por meio de sobreposição de amostras, até que a altura desejada seja alcançada. Essa sobreposição não pode produzir irregularidade na superfície de contato da amostra. Quanto mais regular for a superfície, mais correto será o resultado do ensaio. A carga a ser aplicada sobre a amostra pode ser determinada em função da dureza das amostras. Após essa preparação, deve-se abaixar a temperatura até o valor desejado, em seguida iniciam-se os ciclos de aquecimento e resfriamento contínuos, mantendo-se numa mesma carga.

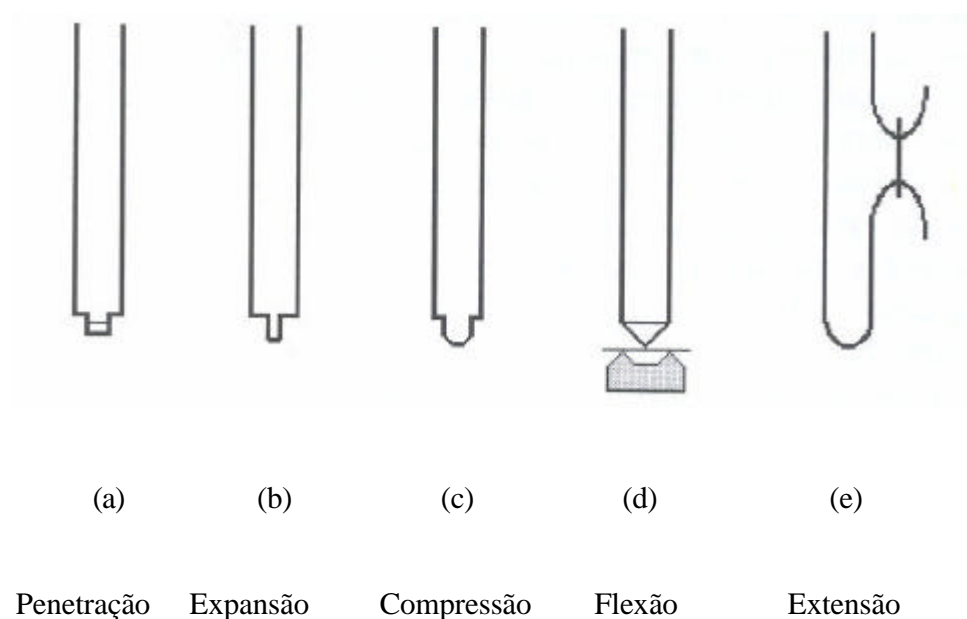


Figura 2.5 -Tipos de sondas utilizadas na análise termomecânica (Lucas et al. (2001)).

A sonda utilizada para esta pesquisa foi de expansão. A finalidade específica deste ensaio foi obter os coeficientes de expansão linear antes e depois da ocorrência da transição da amostra do estado vítreo para o borrachoso e a temperatura de transição vítrea do geossintético (T_g) que é determinada pelo ponto onde ocorre mudança no coeficiente de expansão.

Segundo Lucas et al. (2001), estudos de ensaios de expansão e penetração mostram que as temperaturas de transição sofrem alterações em função da variação da taxa de aquecimento. Entretanto, os coeficientes de expansão independem da variação dessa taxa, mas são sensíveis a alterações estruturais da molécula.

A análise termomecânica possibilita a medição de valores sensíveis de temperaturas relacionadas com as propriedades viscoelásticas dos materiais. Os ensaios que utilizam a sonda do tipo expansão fornecem dados relativos a coeficientes de expansão térmica linear e as transições detectadas pela mudança destes coeficientes, ou seja, alterações na curva de expansão. Os resultados obtidos, utilizando-se o modo de compressão com sondas de penetração, fornece a temperatura de amolecimento, transição caracterizada pelo início da penetração em função do acréscimo da temperatura.

CAPÍTULO III

3) MATERIAIS E MÉTODOS

Durante a instalação e ao longo da vida útil das obras de engenharia os geossintéticos estão sujeitos a solicitações, tais como: esforços de tração, puncionamento, rasgo, variações de temperatura, dentre outras, que podem vir a modificar a estrutura e propriedades desses materiais.

Nesta pesquisa foram realizados ensaios em amostras virgens e em amostras degradadas quimicamente. A degradação química foi proporcionada pela a imersão das amostras virgens em determinados fluidos agressivos, livres de qualquer tensão, por variados intervalos de tempo que variaram entre 3 e 24 meses. Após a imersão, as amostras foram retiradas, lavadas e enxugadas para a realização de estudos adicionais.

Este capítulo apresenta todos os materiais, equipamentos utilizados e as metodologias aplicadas nos ensaios. Foram realizados cerca de 228 ensaios de Resistência a Tração Simples (RTS) em geotêxteis e 128 ensaios de RTS em geomembranas. Todos os gráficos foram gerados a partir de uma média entre 3 ensaios, aproximadamente, para cada caso estudado. Os ensaios de Resistência a Tração Simples foram realizados no Laboratório para Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Os procedimentos adotados nestes ensaios foram os apresentados na norma ASTM D 4595-86. Os ensaios de Análise Termogravimétrica (TG e DSC) e Análise Termomecânica (TMA) seguiram os procedimentos das normas ASTM E831-06, ASTM E967-03 e ASTM E1131-03, respectivamente. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Físico-química em polímeros, da UnB.

3.1) MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.1.1) GEOMEMBRANAS E GEOTÊXTEIS

Nesta pesquisa foram ensaiados geotêxteis com gramaturas variando entre 200g/m² e 600g/m², do tipo não-tecido agulhados, que são materiais compostos por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos. O polímero predominante nos geotêxteis ensaiados era o poliéster (PET), no entanto existiam outros compostos a mistura.

As geomembranas ensaiadas eram de poli-cloreto de vinila (PVC) e de polietileno de alta densidade (PEAD), com espessuras nominais de 1 e 2mm. Todas as amostras foram fornecidas por variados fabricantes. O objetivo em escolher esses materiais com essas características básicas foi para que se pudesse conhecer o comportamento de alguns geossintéticos que são aplicados às áreas de proteção ambiental.

A Tabela 3.1 apresenta as principais características das geomembranas ensaiadas. Estes materiais foram fornecidos pelos fabricantes Sansuy e Engepol. A Tabela 3.2 apresenta as principais características dos geotêxteis, fornecidos pelos fabricantes Bidim e Ober.

Tabela 3.1- Características das Geomembranas - Dados dos Fabricantes.

Código para a pesquisa	Fabricante	Polímero Predominante	Espessura (mm)	Tensão na Ruptura (kPa)	Resistência ao Rasgo (N)	Deformação na Ruptura (%)
GM/A	Sansuy	Poli Cloreto de Vinila	1,0	14000	45	325
GM/B	Sansuy	Poli Cloreto de Vinila	2,0	14000	40	350
GM/C	Engepol	Polietileno de Alta Densidade	1,0	28000	110	600
GM/D	Engepol	Polietileno de Alta Densidade	2,0	32000	300	700

Nota: As normas utilizadas para os ensaios de Tração na Ruptura, Resistência ao Rasgo foram: ASTM D882, ASTM D1004, ASTM D882, respectivamente.

Tabela 3.2- Propriedades Características dos Geotêxteis - Dados dos Fabricantes.

Código para a pesquisa	Fabricante	Polímero Predominante	Gramatura (g/m²)	Resistência à Tração (kN/m)	Deformação na Ruptura (%)
GTX/A	Bidim	Poliéster	200	10	> 60
GTX/B	Ober	Polipropileno	200	12	> 60
GTX/C	Bidim	Poliéster	300	16	> 60
GTX/D	Bidim	Poliéster	400	26	> 60

Nota: As normas utilizadas para os ensaios de Resistência à Tração foram: ASTM D882 e ASTM D4595-96, respectivamente.

3.1.2) FLUIDOS AGRESSIVOS

Os fluidos utilizados para o processo de degradação acelerada de geossintéticos foram: gasolina comum (GSC, pH = 9,5), soda cáustica diluída em água nas proporções de 1% (SC1), 2% (SC2), 3% (SC3), 10% (SC10), 20% (SC20), 30% (SC30) e 50% (SC50, pH = 10,75) de soda e álcool diluído em água na proporção de 97% (ALC97). Cabe ressaltar que as porcentagens citadas são dos fluidos agressivos complementados com água.

As amostras virgens foram cortadas nos tamanhos de 0,50cm x 0,50cm colocadas em imersão nos fluidos supracitados e monitoradas por variados intervalos de tempos. As dimensões das amostras foram escolhidas de maneira que atendessem ao maior número de ensaios (RTS e/ou Análise Química). Antes dos ensaios de RTS todas as amostras foram lavadas com sabão neutro e secadas em temperatura ambiente.

Inicialmente, este trabalho também tinha o como objetivo a utilização de fluidos de mineração e chorume. No entanto, devido às dificuldades encontradas para a obtenção e formas de armazenamento destes fluidos, esses ensaios não foram realizados.

A soda cáustica diluída foi o fluido mais agressivo dentre os utilizados na pesquisa. Apenas com o contato, dependendo da gramatura do geotêxtil as amostras degradaram-se completamente. O fluido GSC foi adquirido do Posto Ecológico da Universidade de Brasília. Devido à evaporação, a GSC foi reposta diversas vezes ao longo dos estudos. Os fluidos, soda cáustica e álcool, foram adquiridos na Casa da Química, Taguatinga-DF.

3.2) TEMPOS DE DEGRADAÇÃO

Os tempos de imersão estipulados para degradar as amostras variaram de 1 a 24 meses, com intervalos de ensaios de 3 em 3 meses. Estes tempos foram estabelecidos a partir da observação do comportamento de amostras após o contato com os fluidos anteriormente citados. Percebeu-se que, para intervalos de tempos menores, muitas amostras não apresentavam transformações. Como o objetivo desses ensaios também era comparar resultados entre si, então foi escolhido o intervalo de tempo ao qual todas as amostras apresentaram algum tipo de transformação. A Figura 3.1 apresenta os recipientes em que as amostras foram armazenadas.



Figura 3.1-Recipientes com os fluidos agressivos nos quais foram imersos os geossintéticos.

3.3) METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios realizados no programa da pesquisa após imersão dos geossintéticos nos fluidos agressivos foram: Resistência a Tração Simples (RTS), Análise Termogravimétrica ou Termogravimetria (TG), Calorimetria Diferencial por Varredura (DSC), Análise Termomecânica (TMA) e Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). Após esses ensaios tornou-se possível analisar o comportamento dos geossintéticos sujeitos às solicitações pré-determinadas em laboratório.

A seqüência dos ensaios de degradação química deu-se a partir da imersão de amostras virgens nos fluidos agressivos, por variados intervalos de tempo, como já citado. Em seguida, essas amostras foram retiradas da imersão e foram submetidas aos ensaios térmicos e mecânicos.

3.3.1) EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO SIMPLES (RTS)

Os ensaios de faixa larga são os mais utilizados para avaliar as propriedades de resistência à tração simples nos geossintéticos. A amostra do material, nas dimensões de 100mmX200mm que se deseja ensaiar é fixada por garras à prensa de tração. Em seguida, a amostra é tracionada a uma velocidade constante de 10mm/min, até a ruptura. O procedimento usado obedeceu à norma ASTM D – 4595-96. Durante o ensaio foram realizadas leituras de deslocamentos e cargas, até a ruptura da amostra.

O equipamento utilizado nestes ensaios foi uma prensa MTS 810 – *Material Test System*, garras *SERIES 647* tipo *Hydraulic Wedge Grips*. O ensaio é monitorado por um programa computacional interligado à máquina de tração. Antes de iniciar o ensaio, alguns procedimentos importantes devem ser realizados dentro do programa computacional que comanda a prensa. Estes passos são descritos no ANEXO I desta tese. A Figura 3.2 exibe a primeira tela antes da partida do ensaio. As Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam o equipamento de RTS e um ensaio em andamento com uma amostra de geotêxtil.

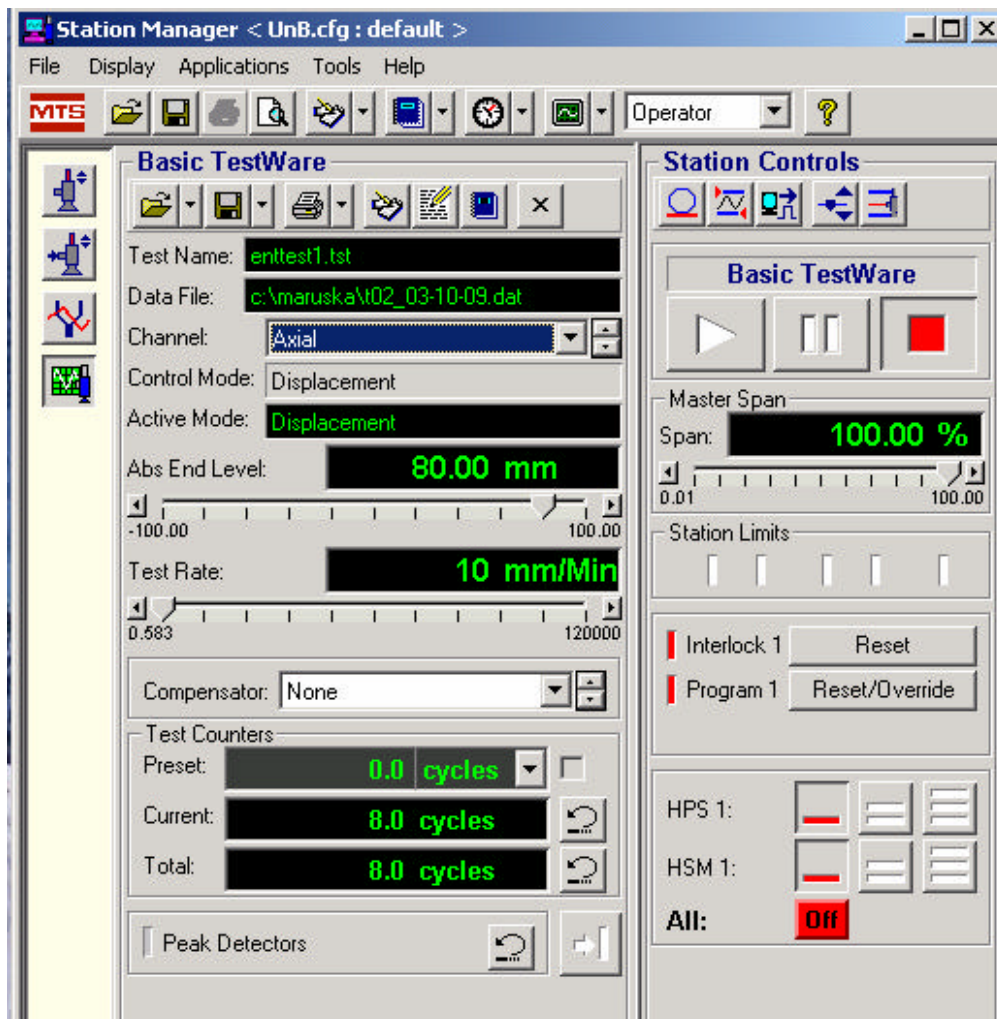


Figura 3.2- Tela inicial do programa computacional para a realização do ensaio de RTS.



Figura 3.3- Amostra de geotêxtil no início do ensaio de RTS.

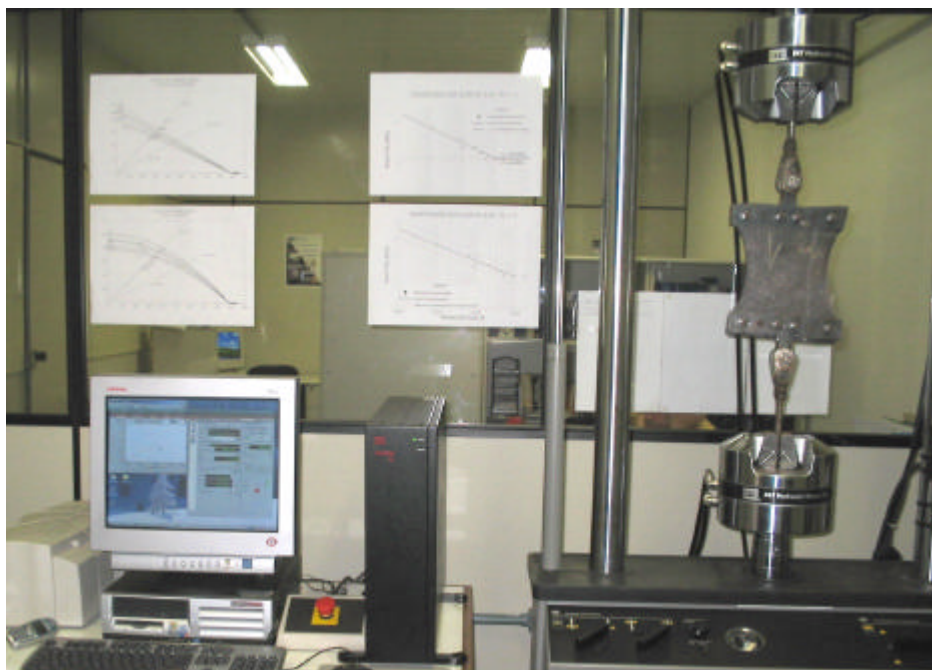


Figura 3.4- Vista geral do equipamento de RTS com um ensaio em andamento.

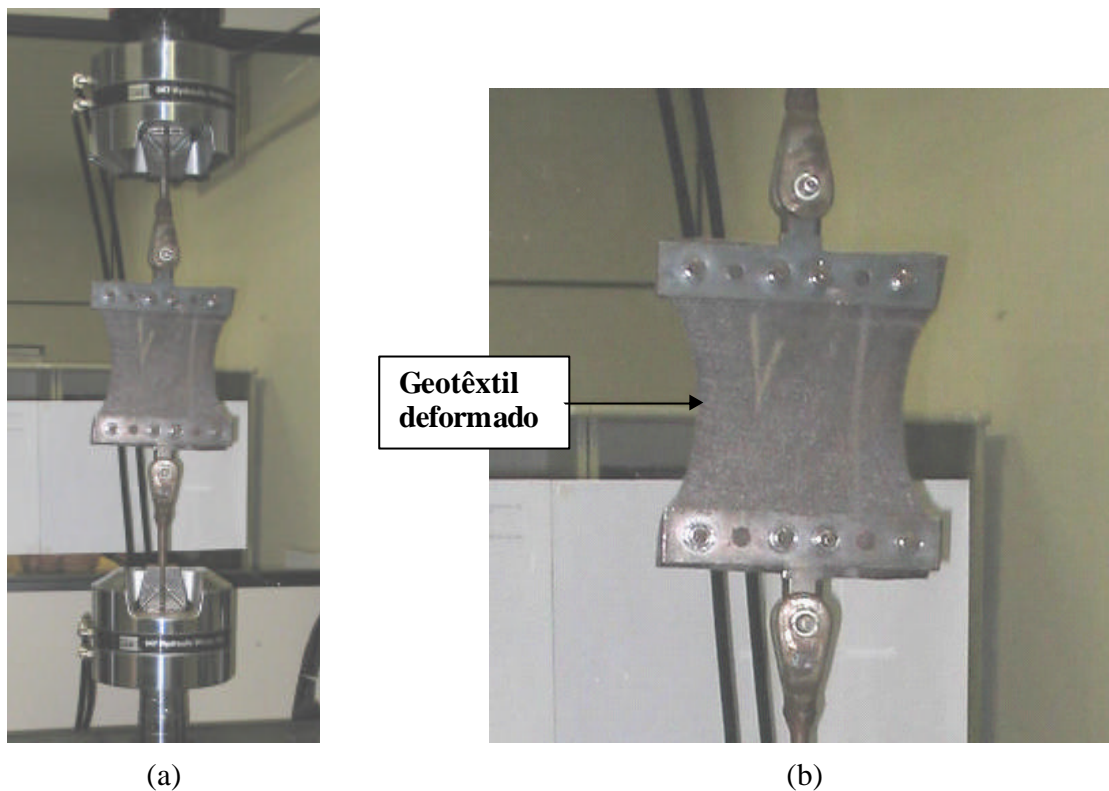


Figura 3.5-Ensaio de RTS em andamento com amostra de geotêxtil.

3.4) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O ENSAIO DE TERMOGRAVIMETRIA (TG)

O equipamento utilizado para o ensaio de termogravimetria é constituído basicamente por uma microbalança, um forno, um programador de temperatura e um sistema de aquisição de dados (computador). As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam o equipamento de análise termogravimétrica que pertence ao Laboratório de Físico-Química em Polímeros da Universidade de Brasília.

Para a realização do ensaio, inicialmente devem-se estabelecer, no programa computacional interligado ao equipamento, as temperaturas inicial e final da análise e a velocidade de variação de temperatura. Caso a análise seja para uma situação isotérmica, deve-se fornecer a temperatura e o tempo do ensaio. Coloca-se o cadinho vazio no equipamento, para zerar a massa desse recipiente. Retira-se o cadinho do equipamento, e coloca-se a amostra. Devolve-se o conjunto (amostra e cadinho) para o equipamento, podendo ser dado o comando para a leitura de variação

de massa da amostra com a variação de temperatura. Ao se realizar o ciclo completo de temperatura pré-estabelecido, retira-se o cadinho com o que restou da amostra e efetua-se a limpeza desse recipiente. Todas as informações permanecem gravadas no computador e é gerada uma curva de variação de massa em porcentagem (%) X variação de temperatura ou tempo.

Segundo Lucas et al. (2001), 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.

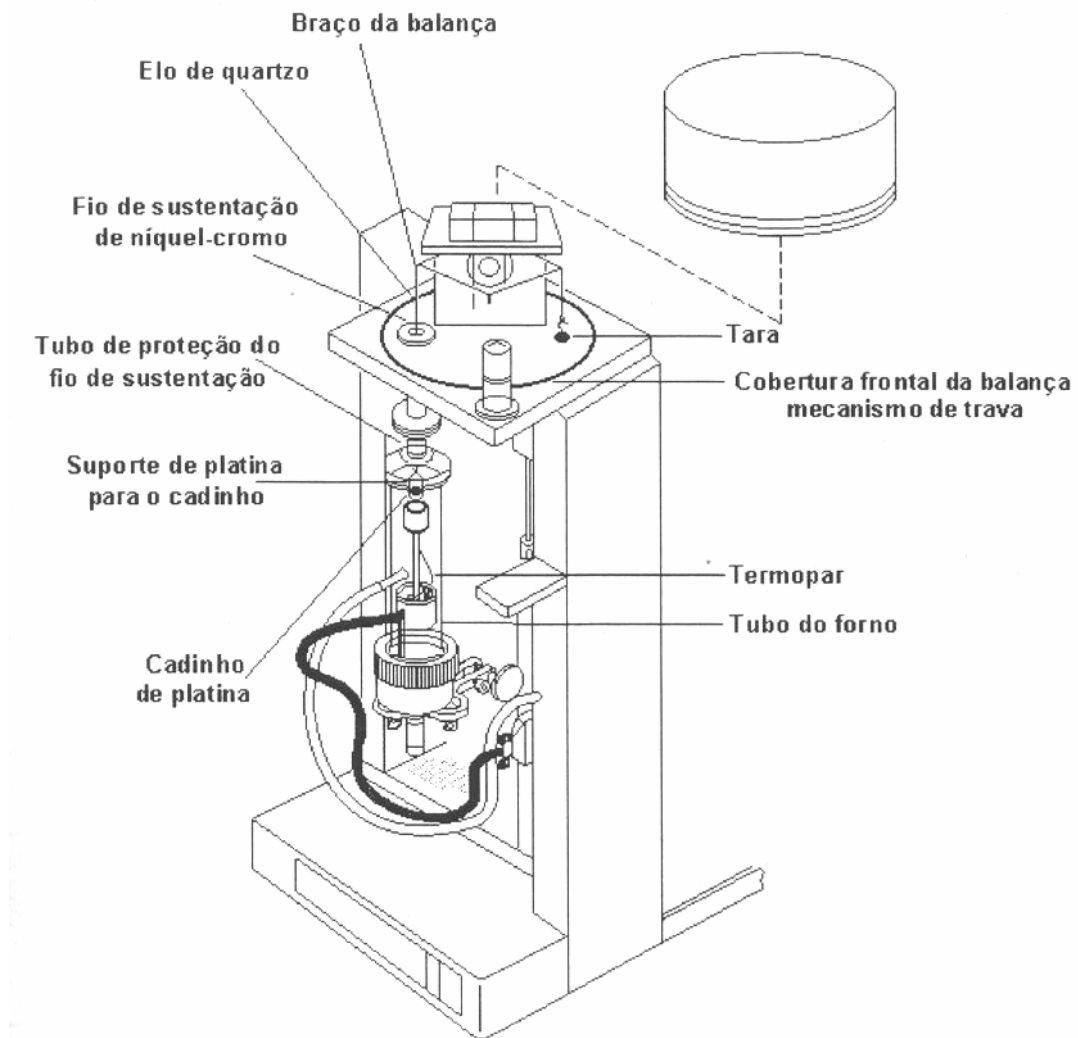


Figura 3.6 - Equipamento detalhado utilizado para o ensaio de termogravimetria (Lucas et al. 2001).



Figura 3.7 - Equipamento de termogravimetria.

Adotou-se para esta pesquisa a velocidade de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. O intervalo de temperatura adotado foi de 0 até 600°C . Essa velocidade e variação de temperatura são usualmente utilizadas para ensaios com polímeros.

3.5) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA O ENSAIO DE CALORIMETRIA DIFERENCIAL POR VARREDURA (DSC)

A Figura 3.8 apresenta o diagrama de blocos de componentes do ensaio de DSC. Observa-se a presença de uma amostra de referência inerte que servirá como parâmetro de comparação para a amostra que está sendo estudada. Após o início do ensaio o programa computacional acompanha o comportamento da amostra de referência e da amostra que está sendo ensaiada. A Figura 3.9 apresenta uma fotografia do equipamento.

Inicialmente, deve-se adotar as temperaturas inicial, final e a velocidade de aquecimento ou resfriamento para o ensaio. Para a análise isotérmica deve-se estabelecer a temperatura a ser fixada e o tempo de análise, conforme é também determinado para o ensaio de termogravimetria

(TG). Em seguida, coloca-se a amostra dentro de um cadinho, de alumínio, provida de uma tampa. A amostra é pesada e a seguir, esse cadinho é selado numa prensa. O contato entre as superfícies do material e a do cadinho deve ser máximo, uma vez que isto melhora o resultado do ensaio. A amostra de referência (cadinho vazio) também deve ser colocada dentro do equipamento. Digita-se a massa da amostra e pode-se iniciar o ensaio.

Segundo Lucas et al. (2001), esse ensaio fornece:

- As temperaturas de transição do polímero: transição vítrea (T_g), temperatura de cristalização (T_c), temperatura de fusão (T_m);
- Algumas medidas quantitativas do polímero: calor específico (C_p), calor de fusão (ΔH_f), calor de cristalização (ΔH_c), calor de reação (ΔH_r).

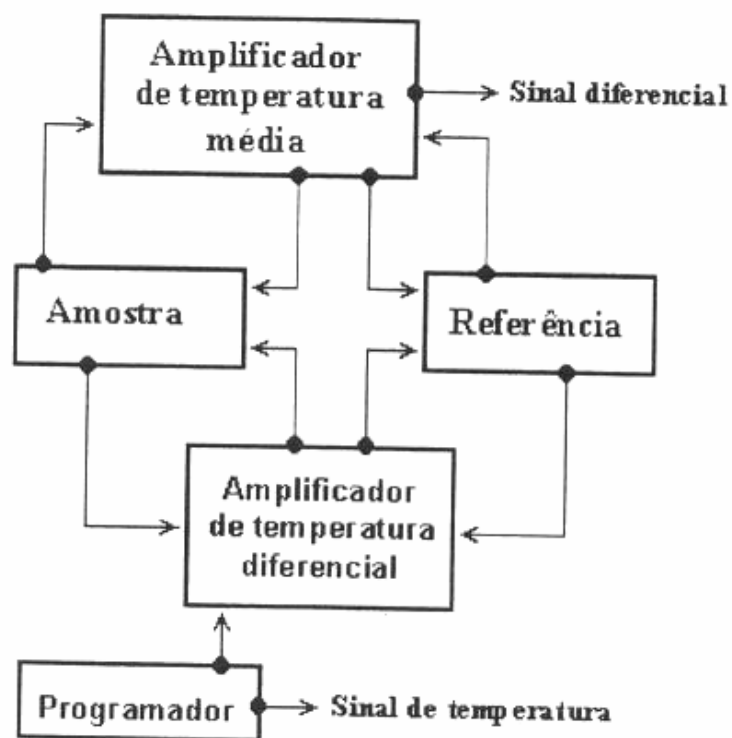


Figura 3.8-Diagrama de blocos do DSC (Lucas et al. 2001).



Figura 3.9-Equipamento de calorimetria diferencial por varredura - DSC.

Este ensaio apresenta uma curva de fluxo de calor (miliwatts) X temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ou tempo (min). A faixa de temperatura possível no ensaio é de -170°C a 1600°C . Nesta pesquisa foram adotadas temperaturas de -10°C , mínima típica encontrada no Brasil, até 500°C , máxima a que alguns geossintéticos podem resistir.

3.6) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA ANÁLISE TERMOMEICÂNICA (TMA)

Este ensaio analisa as deformações de uma amostra sob a ação de uma carga não oscilatória. As deformações são medidas como uma função de temperatura ou do tempo a uma temperatura constante, quando o material é submetido a um programa controlado de temperatura. A Figura 3.10 apresenta o esquema do equipamento. Observa-se um transformador diferencial variável linear (LVDT) que funciona como sensor, posicionado no eixo de deslocamento do aparelho, e que detecta o quanto esse eixo se desloca durante o ensaio.

Conforme citado em Revisão Bibliográfica, neste ensaio existem acessórios (sondas) que podem ser adaptados na extremidade do eixo de deslocamento do aparelho, que irá determinar o tipo de deformação da amostra. Para esta pesquisa utilizou-se a sonda para o modo expansão.

Segundo Lucas et al. (2001) a amostra deve apresentar área superficial em torno de 8,0mm² e espessura próxima a 2,0mm. O registro da altura é efetuado quando a sonda de expansão é colocada sobre a amostra. Quanto mais plana for a superfície, mais preciso será o resultado. O carregamento é aplicado sobre a amostra e é determinado em função da dureza das amostras.

Este ensaio propicia medidas sensíveis de temperatura relacionadas com as propriedades viscoelásticas do material. O ensaio no modo expansão fornece dados relativos aos coeficientes de expansão térmica linear e às transições detectadas pela mudança destes coeficientes. Pode-se ainda determinar a temperatura de transição vítrea pelo ponto onde ocorre uma mudança no coeficiente de expansão.

Cabe esclarecer que para esses ensaios as amostras foram cortadas em lâminas com espessura de 200 a 500 µm. Não foram realizados ensaios nas amostras GM/C e GM/D devido limitações de tempo e, à dificuldade de preparação das amostras amostras, que apresentaram elevada rigidez após as imersões dificultando o corte nas espessuras necessárias para o ensaio. A temperatura de transição vítrea (T_g) foi medida pelo método do prolongamento das retas, e o coeficiente de expansão linear (α) foi calculado pela equação (5.1).

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T L_0} \quad (3.1)$$

Onde: α = Coeficiente de expansão linear
 ΔL = Variação da espessura
 ΔT = Variação da temperatura
 L_0 = Espessura original da amostra

A Figura 3.11 apresenta uma fotografia do equipamento de TMA.

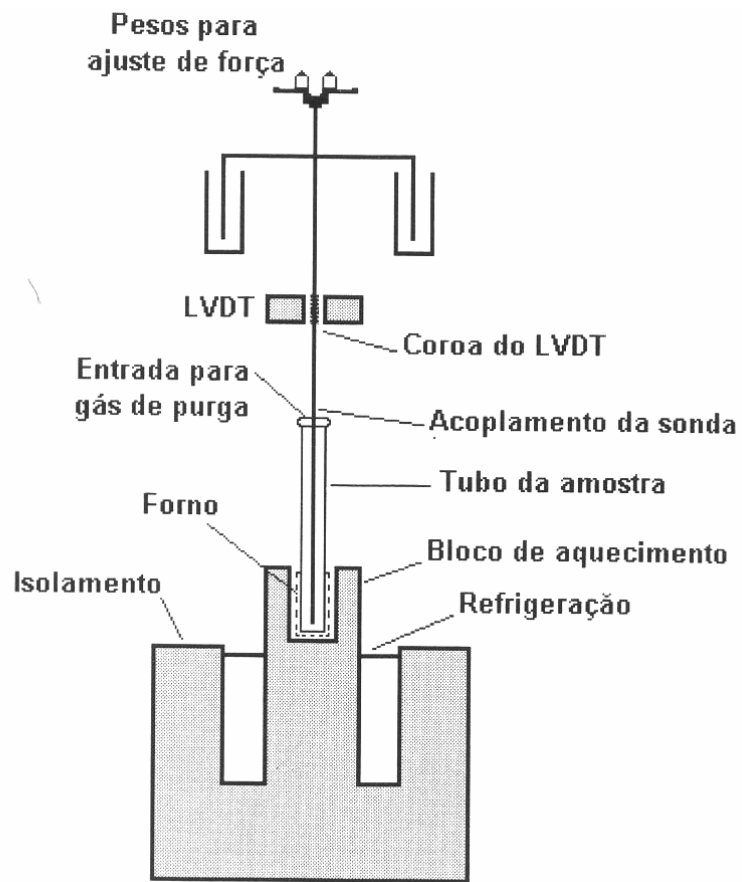


Figura 3.10 - Esquema do equipamento para análise termo mecânica (Lucas et al. 2001).



Figura 3.11-Equipamento Análise Termomecânica.

3.7) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A ANÁLISE MICROSCÓPICA

Para a análise microscópica utilizaram-se os seguintes equipamentos: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), microscópio ótico (MO) e câmera digital. O MEV apresenta imagens com aparência tridimensional, este tipo de análise se dá quando ocorre a necessidade de avaliar amostras espessas, que não sejam transparentes a elétrons. O MO apresenta imagens com aparência bidimensional e possibilita a avaliação da superfície de amostras degradadas ou não degradadas.

As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 apresentam o microscópio eletrônico de varredura (MEV) completo, parte do microscópio onde as amostras (Figura 3.14) foram inseridas e o equipamento sendo utilizado (introdução de uma amostra), respectivamente. Esse ensaio é controlado por programa computacional que apresenta em uma tela a imagem da superfície da amostra em estudo.

Inicialmente faz-se necessário a colagem das amostras em pequenas peças de bronze (diâmetro de aproximadamente 1,0cm), em seguida essas amostras receberam uma metalização com pó de ouro (esse procedimento é fundamental para a perfeita visualização da superfície das amostras no MEV). As Figuras 3.15, 3.16 e 3.17 apresentam mais detalhes da seqüência do equipamento.

* Metalização: Consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor (ouro ou carbono) sobre a superfície da amostra.



Figura 3.12 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

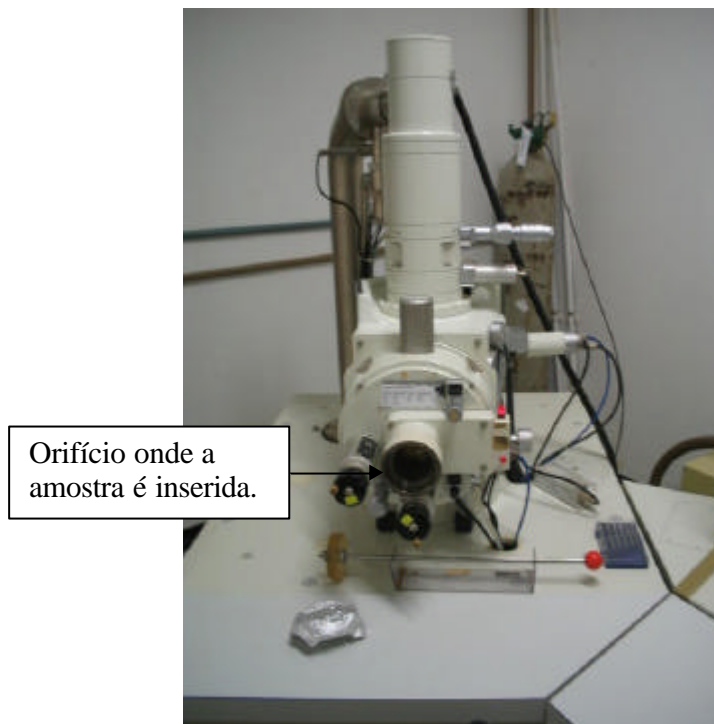


Figura 3.13 – Parte do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Figura 3.14 – Amostra sendo introduzida no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Figura 3.15 – Amostras de geomembranas preparadas para serem digitalizadas no MEV.



Figura 3.16 – Equipamento que proporciona a metalização das amostras.



Recipiente onde as amostras são inseridas para metalização com ouro em pó.

Figura 3.17 – Detalhe do equipamento onde as amostras metalizadas com o ouro.

A Tabela 3.3 apresenta os materiais utilizados nesta pesquisa e a programação dos ensaios realizados.

Tabela 3.3 – Programação de ensaios realizados em amostras, virgens e degradadas quimicamente.

Geossintético	Tempos de imersão	Fluido agressivo	Ensaio realizados
Geomembranas em PVC com 1,0mm de espessura (GM/A)	0, 3, 6,9,12,18,21 e 24 meses	SC50, ALC97 e GSC	TG, TMA e RTS
Geomembranas em PVC com 2,0mm de espessura (GM/B)	0,3,6,9,12,18,21 e 24 meses	SC50, ALC97 e GSC	TG, TMA e RTS
Geomembranas em PEAD com 1,0mm de espessura (GM/D)	3, 6, 9 e 12 meses	SC50, ALC97 e GSC	TG e RTS
Geomembranas em PEAD com 2,0mm de espessura (GM/E)	3, 6, 9 e 12 meses	SC50, ALC97 e GSC	TG e RTS
Geotêxtil com gramatura de 200g/m ² - GTX/A (fabricante A)	3, 6 e 12 meses	SC1, SC3, SC50, GSC, ALC97	RTS
Geotêxtil com gramatura de 400g/m ² - GTX/D	3, 6, 9 e 12 meses	SC1, ALC97 e GSC	RTS
Geotêxtil com gramatura de 600g/m ² - GTX/E	3, 6, 9 e 12 meses	SC1, ALC97 e GSC	RTS
Geotêxtil com gramatura de 200g/m ² - GTX/B (fabricante B)	3, 6 e 9 meses	SC1, SC3 e ALC97	RTS

CAPÍTULO IV

4) APRESENTAÇÃO E ANÁLISE TÁCTIL-VISUAL DE GEOTÊXTEIS APÓS ENSAIOS MECÂNICOS

4.1) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO EM AMOSTRAS VIRGENS DE GEOTÊXTEIS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA POR MEIO DE IMERSÃO

Os gráficos nesta etapa da pesquisa apresentam valores médios de resultados de 3 ensaios para amostras degradadas e 6 ensaios para amostras virgens. Os materiais utilizados foram geomembranas (GM) e geotêxteis (GTX). Devido à prensa de ensaio de tração simples não ter sido utilizada em nenhuma pesquisa até o presente estudo foram realizadas maiores quantidades de ensaios em amostras virgens para a calibração do equipamento. A aquisição de dados desta prensa é computadorizado e toda o ensaio é controlado através de programa computacional.

Os resultados de Resistência a Tração Simples com as amostras de geotêxteis virgens foram compatíveis aos resultados obtidos por Matheus (2002) em tese de doutorado, que tratou de degradação em amostras de geossintéticos por meio de dano mecânico induzido, ação de ultravioleta e calor. Cabe salientar que a prensa utilizada por esse autor não foi a mesma desta pesquisa, foi uma prensa que não possui o sistema de aquisição de dados computadorizado e o controle do ensaio manual.

4.2) RESULTADOS DAS AMOSTRAS DE GEOTÊXTEIS VIRGENS

Estas amostras não foram submetidas a nenhum processo de degradação, no entanto deve-se ressaltar a variabilidade na gramatura dos materiais ensaiados. Em diversas partes da manta observa-se um preenchimento desproporcional das fibras e essa característica influencia nas propriedades intrínsecas do material, podendo reduzir muitas vezes o desempenho do geossintético, quanto às expectativas e necessidades dos projetos.

A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 apresentam os resultados médios de Resistência a Tração Simples (RTS) para amostras dos geotêxteis GTX/A, GTX/B, GTX/D e GTX/E. O GTX/A e o GTX/B são geotêxteis de diferentes fabricantes.

Tabela 4.1- Resultados de resistência a tração simples (RTS) em amostras ensaiadas no estado virgem.

Tipo de Geotêxtil	Resistência à Tração do Ensaio (kN/m)
GTX/A	11,50
GTX/B	9,00
GTX/D	19,50
GTX/E	30,00

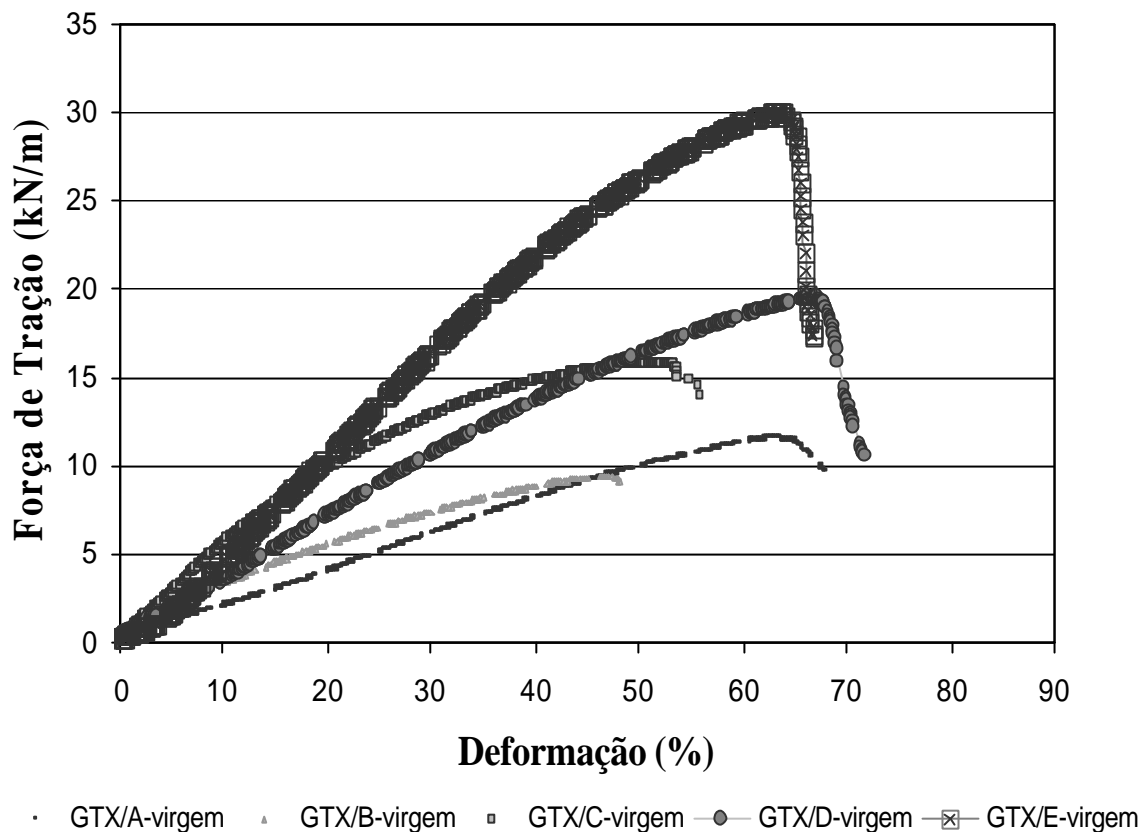


Figura 4.1-Resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX virgens.

4.3) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/A VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

4.3.1) FLUIDO AGRESSIVO GSC

a) Tempo de Imersão: 3 meses

A Figura 4.2 apresenta a comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras virgens e em amostras que foram submetidas à imersão no fluido GSC pelo intervalo de tempo de 3 meses. Observa-se que a amostra degradada não apresentou grandes perdas quando comparadas às amostras virgens, esta redução ficou em torno de 4,3%. Quanto à deformabilidade máxima, percebe-se que a redução da amostra degradada em relação à virgem foi de aproximadamente

6,6%. Pode-se constatar que a presença do hidrocarboneto não influenciou, significativamente, no valor da resistência mecânica do GTX/A para este intervalo de tempo de imersão.

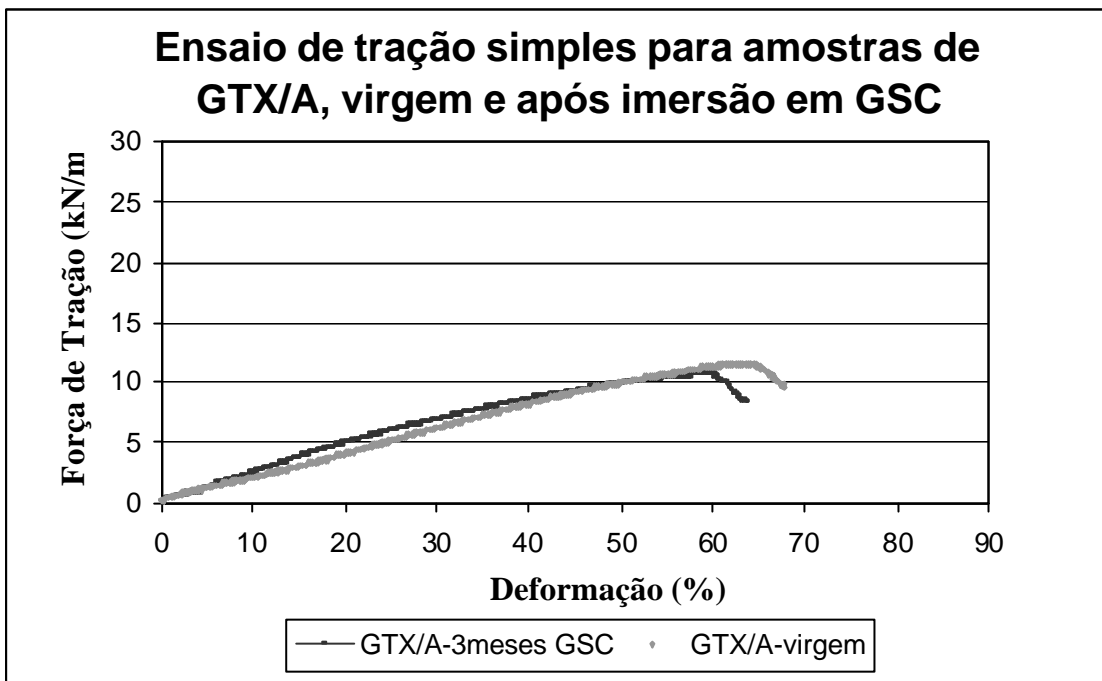


Figura 4.2-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 3 meses).

b) Tempo de Imersão: 6 meses

A Figura 4.3 apresenta a comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras virgens e amostras que foram imersas no fluido GSC pelo intervalo de tempo de 6 meses. Observa-se que a resistência e a deformação das amostras degradadas foram superiores aos valores encontrados para as amostras antes da imersão. No entanto, este fenômeno não significa que as amostras, após a imersão, não sofreram alterações em suas propriedades. Pode-se afirmar que ocorreu um rearranjo dos filamentos do GTX/A após o contato com o fluido GSC pelo período de 6 meses.

Este resultado é oposto ao que foi constatado para o mesmo GTX/A com o tempo de imersão de 3 meses (Figura 4.1). Percebe-se que a degradação é gradativa, nos primeiros tempos não foram

observadas mudanças que causassem preocupações visíveis quanto à resistência máxima que o GTX/A pode absorver.

Com o acréscimo do tempo de imersão a resistência máxima aumentou em aproximadamente 13%. Este ganho *aparente* de RTS é indício de degradação química.

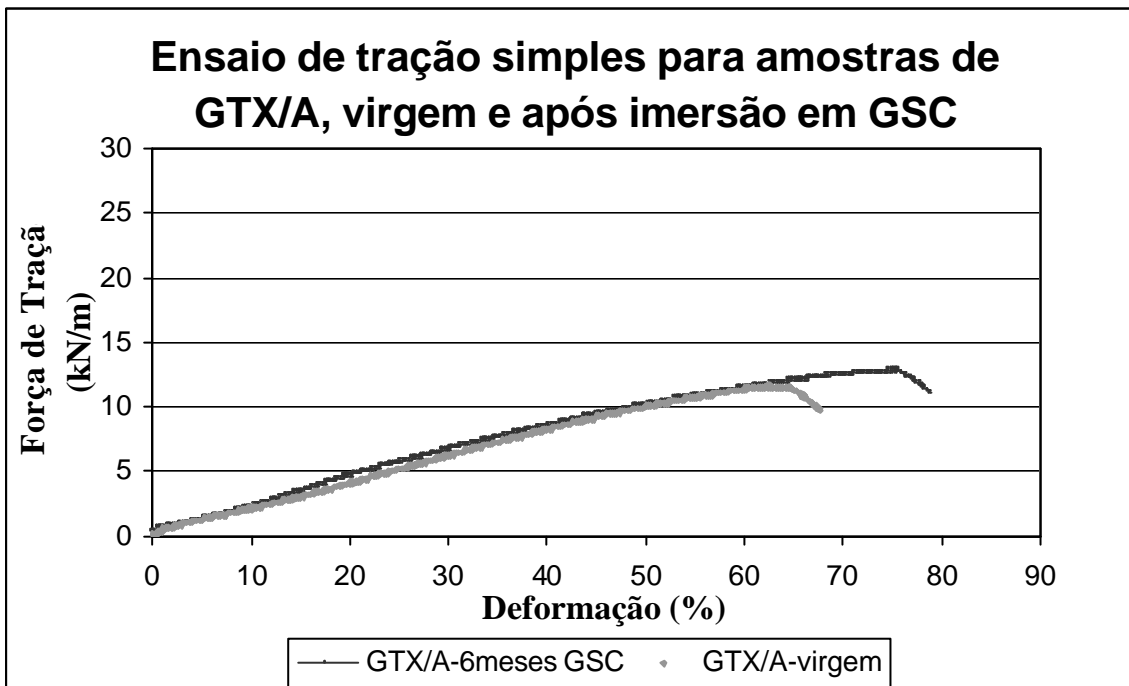


Figura 4.3-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 6 meses).

c) Tempo de Imersão: 12 meses

A Figura 4.4 apresenta os resultados observados para amostras de GTX/A virgens e GTX/A após 12 meses de imersão em GSC, o comportamento foi semelhante àquele observado para amostras que permaneceram em imersão pelo tempo de 6 meses.

Nota-se que a amostra após o contato com o fluido GSC pelo período de 12 meses obteve deformação de aproximadamente 80%, esse valor é superior ao observado para as amostras virgens (70%).

Através de inspeção tátil-visual foi constatado que as amostras não sofreram alterações para o tempo de imersão de 3 meses. Enquanto que, para o tempo de 6 meses, as amostras tenderam a *ganhar* em torno de 13% no valor da Resistência à Tração Simples, com o aumento do tempo de imersão para 12 meses ocorreram reduções na RTS em torno de 4% em relação às amostras virgens.

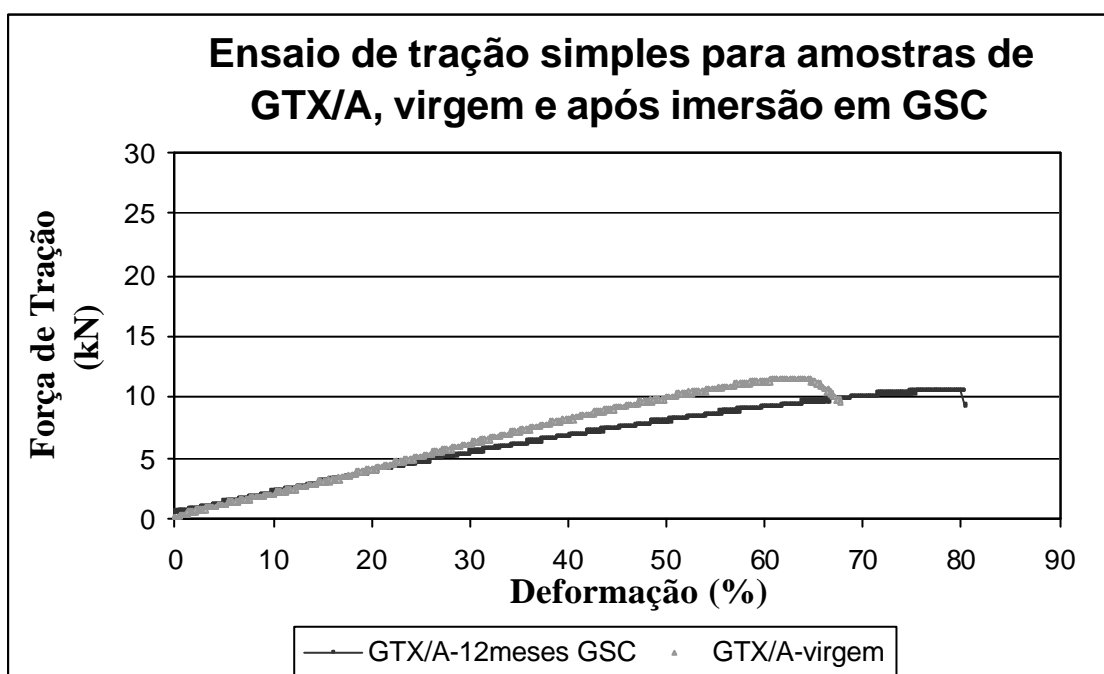


Figura 4.4-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 12 meses).

Comparando as Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, percebe-se que para o primeiro tempo de imersão (3 meses), as amostras de GTX/A sofreram pequenas reduções no valor da RTS, posteriormente para o tempo de 6 meses estas mesmas amostras se recuperaram e aumentaram o valor desta RTS, reduzindo esse valor com o aumento do tempo de imersão para 12 meses.

O contato do fluido GSC com as amostras de GTX/A causou alterações na estrutura interna dos materiais, porém não se pode afirmar que estas alterações são intrínsecas às cadeias poliméricas que formam o polímero constituinte da amostra. É mais provável que todas estas transformações sejam apenas externas aos filamentos das amostras.

4.3.2) FLUIDO AGRESSIVO SC1%

a)Tempo de Imersão: 3 meses

Os comportamentos dos GTX/A após imersão em SC1% foram completamente diferentes daqueles observados para as amostras de GTX/A após imersão em GSC, essas diferenças ocorrem devido a composições químicas dos fluidos não ser a mesma.

Afirma-se que as informações dos fabricantes que tratam do comportamento dos GTX quando submetidos ao contato com fluidos agressivos devem ser diferenciadas para cada aplicação, caso contrário essa aplicação possivelmente estará sendo incorretas.

A Figura 4.5 apresenta os resultados dos ensaios de RTS das amostras de GTX/A virgens e das amostras após imersão no fluido SC1% pelo período de 3 meses. Observa-se que as amostras após a imersão reduziram o valor da resistência à tração máxima em aproximadamente 80% quando comparadas às amostras virgens.

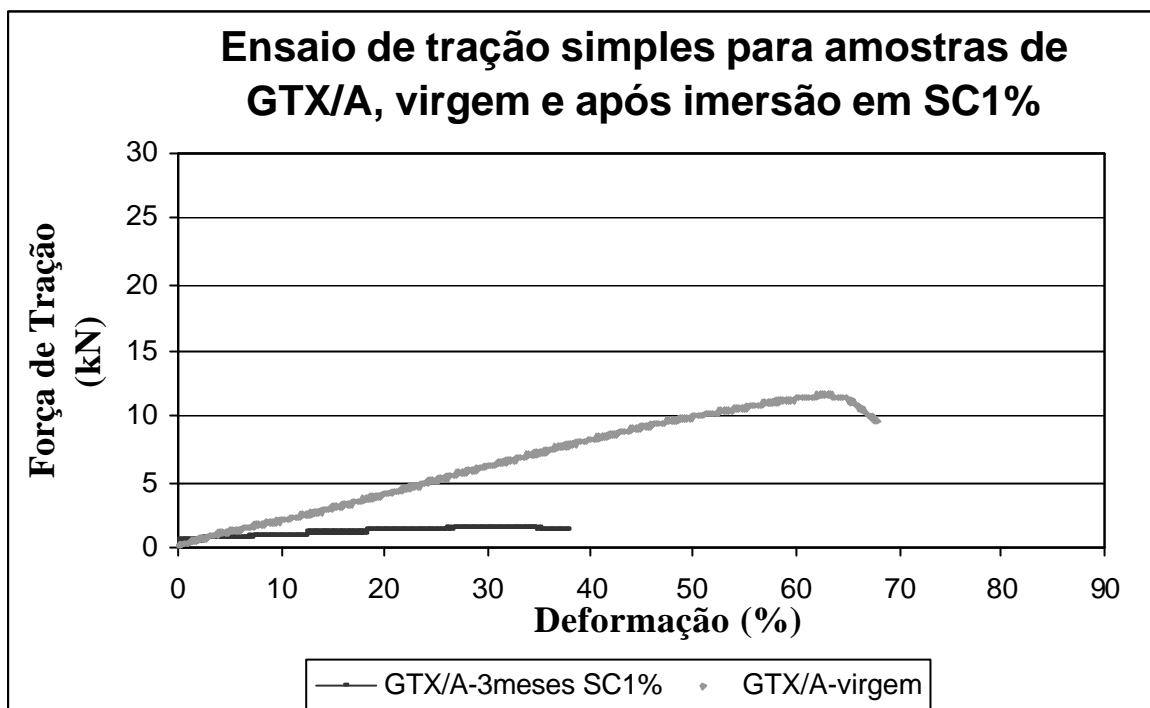


Figura 4.5-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).

b) Tempo de Imersão: 6 meses

A Figura 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de RTS de amostras de GTX/A após imersão em SC1% pelo período de 6 meses. Nota-se que as amostras após o tempo de degradação perderam em torno de 93% no valor da RTS máxima quando comparadas às amostras virgens. Percebe-se que o fluido SC1% é extremamente prejudicial à estrutura das amostras.

Cabe ressaltar que os fluidos utilizados para acelerar o processo de degradação foram escolhidos mediante inúmeros testes de resistência dos GTX quando submetidos ao contato com estas substâncias. Em algumas situações de imersão a decomposição das amostras foi praticamente instantânea.

Mediante a colocação supracitada, fez-se necessário à diluição do fluido SC em variadas proporções conforme citado no capítulo 3 porém só a proporção de 1% em H₂O que possibilitou a continuidade dos experimentos, para os tempos escolhidos para os ensaios. As diluições de 2% (SC2%), 3% (SC3%), 10% (SC10%), 20% (SC20%), 30% (SC30%) e 50% (SC50%) foram tentativas de ensaio que para a maioria dos tempos de imersão proporcionaram a diluição completa das amostras.

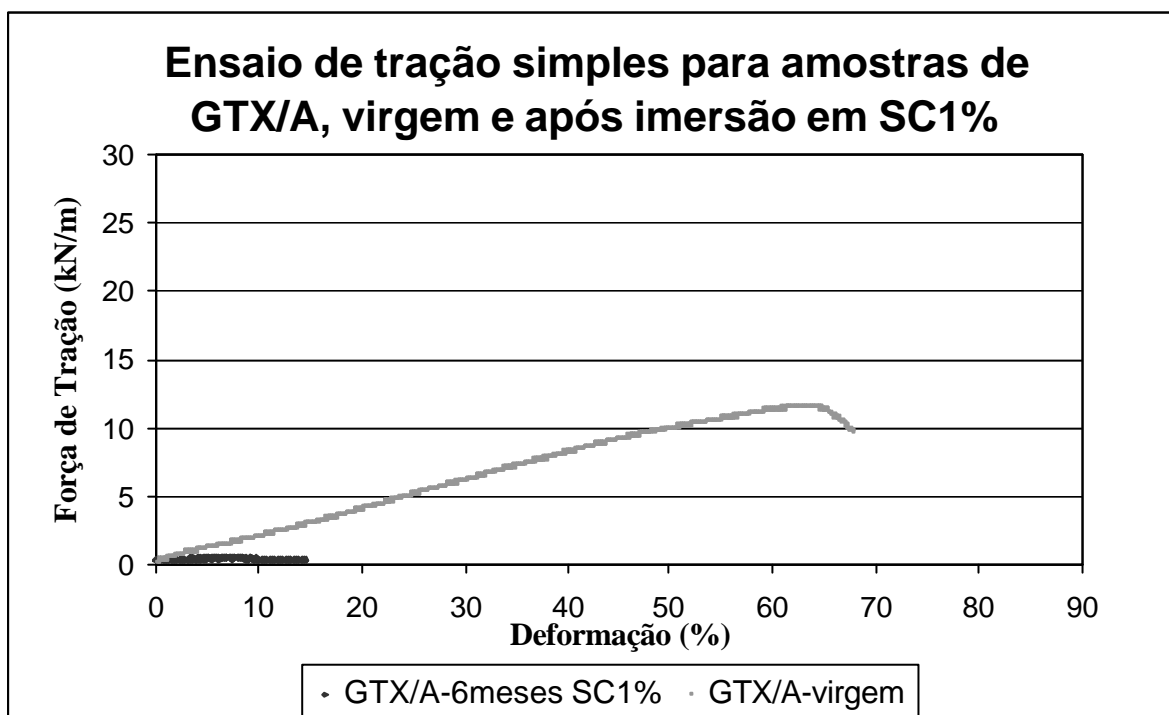


Figura 4.6-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).

4.3.3) FLUIDO AGRESSIVO SC50%

a) Tempo de Imersão: 7 dias

Observa-se nas Figuras 4.7 e 4.8 o aspecto dos GTX e GM após imersão no fluido SC50%. A partir de uma análise tátil-visual as amostras degradaram-se completamente, este fenômeno foi

observado também para as amostras que foram imersas em SC1%, SC3%, SC5%, SC10%, SC20% e SC30%.

A Figura 4.8 apresenta o aspecto dos GTX microscopicamente (*zoom* de 5X), observou-se uma mistura, aparentemente homogênea, dos GTX e o fluido SC50%.

Segundo uma inspeção táctil-visual, as amostras de geomembranas (GM) ficaram enrijecidas e bastante deformadas, essas geomembranas são predominante de Poli (cloreto de vinila). O Capítulo 5 apresenta resultados mais objetivos para geomembranas.

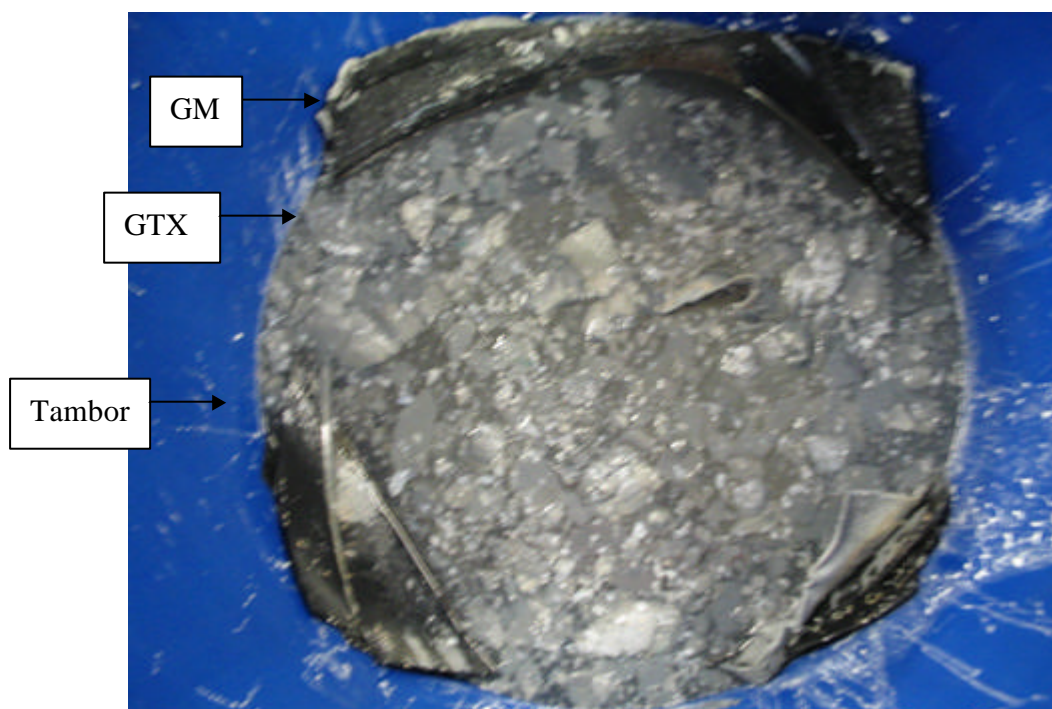


Figura 4.7-Aspecto dos geossintéticos – GTX e GM após imersão em SC50% (Tempo de imersão: 7 dias).

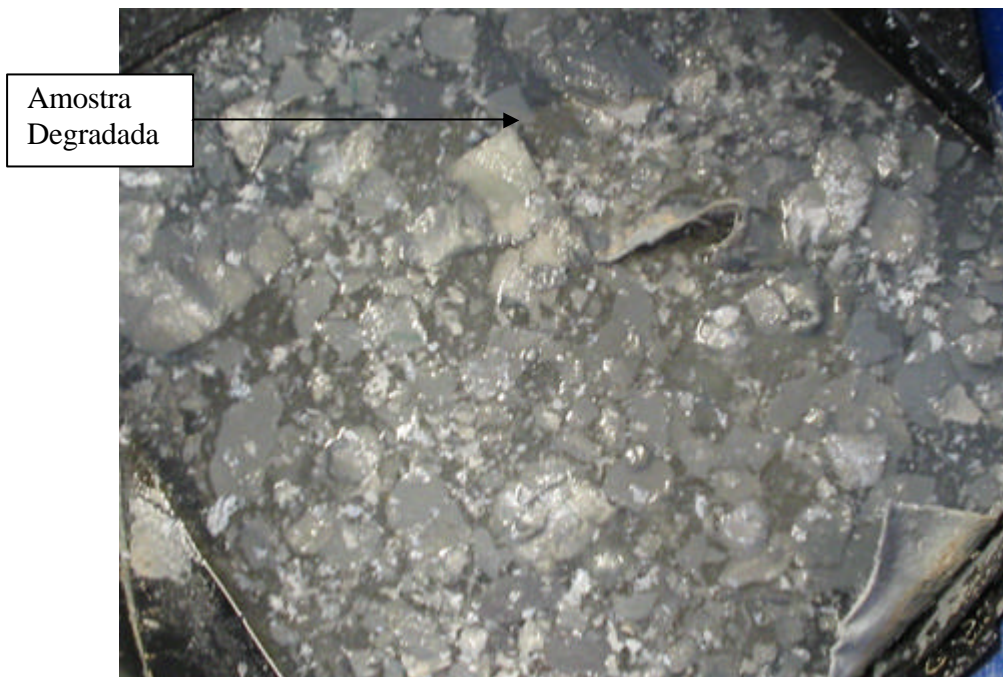


Figura 4.8- Aspecto dos geossintéticos – GTX e GM após imersão em SC50% - *Zoom de 5X* (Tempo de imersão: 7 dias).

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram as condições de degradação do geossintético GTX/A após contato com o fluido SC50%, o tempo de contato do fluido com a amostra que proporcionou o dano químico observado foi de aproximadamente 4 horas. As amostras foram corroídas e também surgiram rasgos de tamanhos em torno de 15cm de comprimento por 10 cm de largura.

Observa-se ainda na Figura 4.9 a presença de GM, estas amostras permaneceram intactas após o contato com o fluido SC50%, cabe salientar que as amostras de GM são predominantemente Polietileno de Alta Densidades (PEAD) e que não apresentaram nenhuma alteração visual considerável apenas enrijecimento.

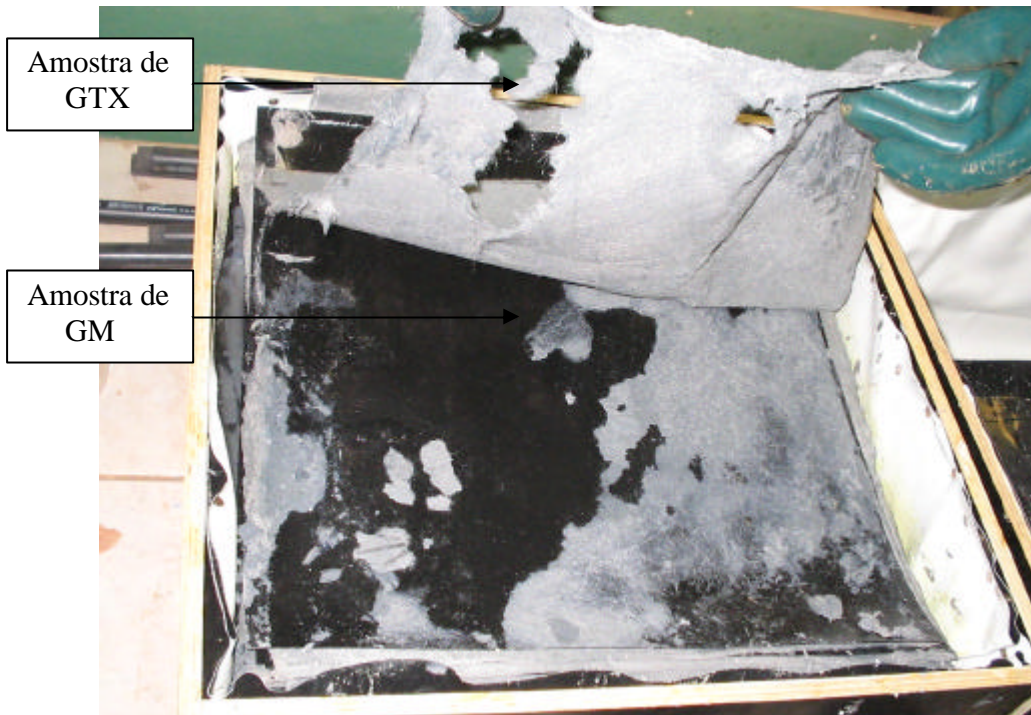


Figura 4.9-Retirada do GTX/A do recipiente após contato com o fluido SC50%.

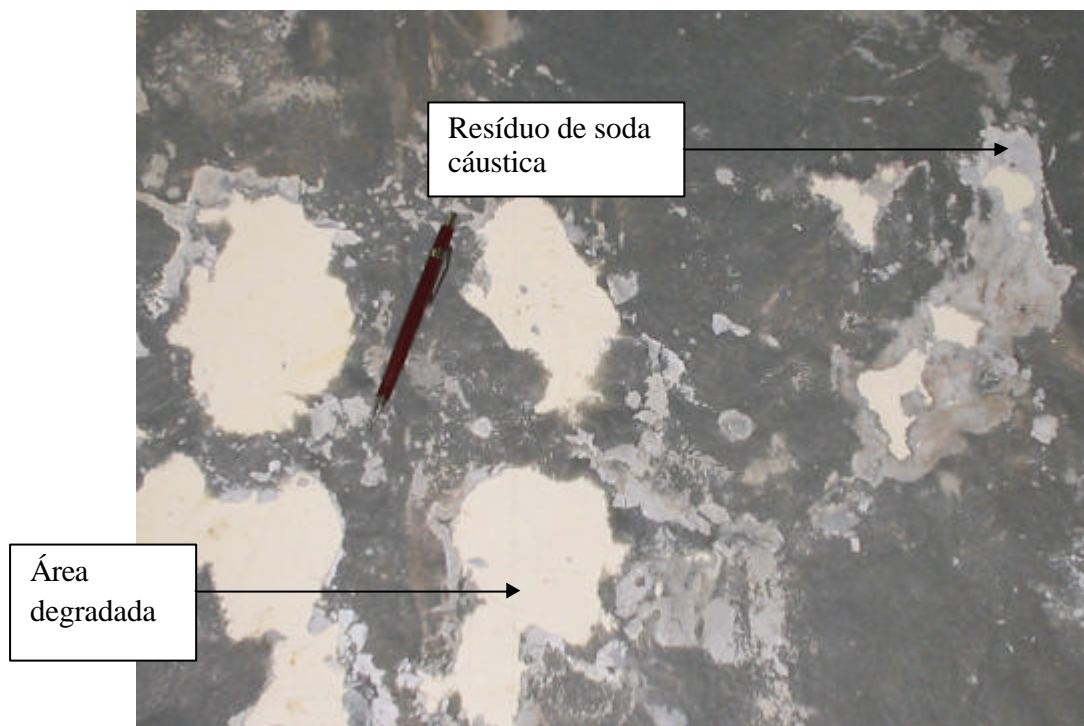


Figura 4.10-Aspecto do GTX/A após contato com o fluido SC50%.

4.3.4) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%

a) Tempos de Imersão: 3 meses

Os resultados observados para as amostras de GTX/A após imersão em ALC97%, para o tempo de imersão de 3 meses, demonstraram que a resistência à tração simples foi 17,4% menor do que os resultados encontrados para amostras virgens (Figura 4.11). A presença do fluido em contato com as amostras por este intervalo de tempo reduziu a resistência à tração e a capacidade de deformação das amostras.

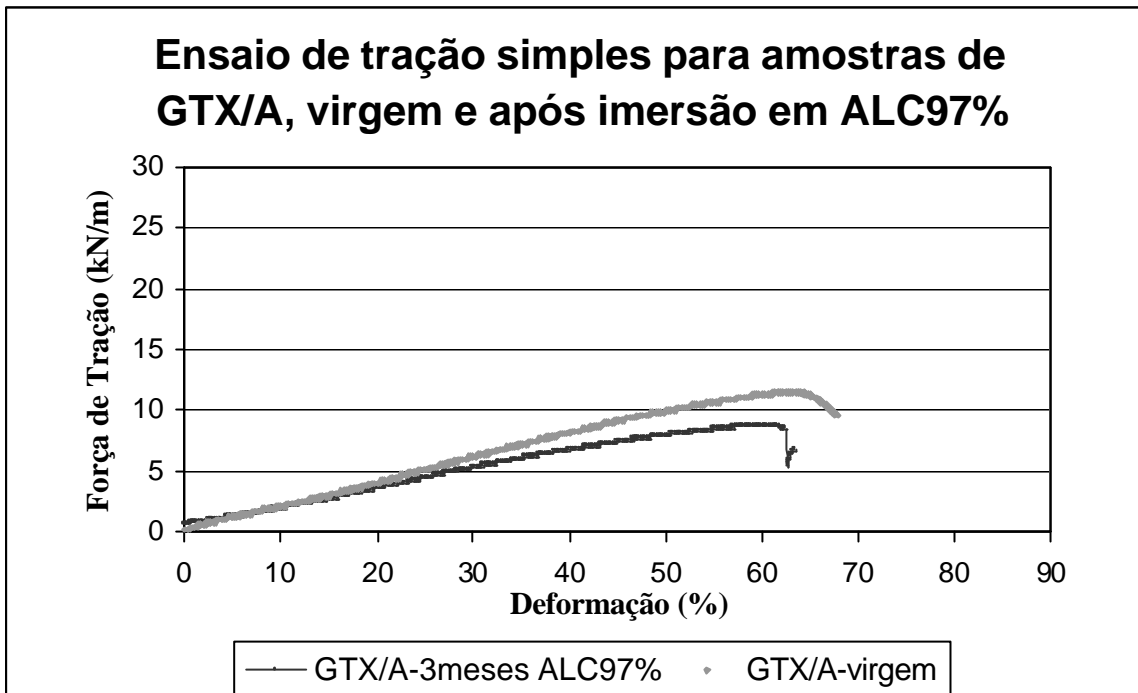


Figura 4.11-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).

b) Tempo de Imersão: 6 meses

A Figura 4.12 apresenta os resultados observados para as amostras de GTX/A após imersão em ALC97%, para o tempo de imersão de 6 meses, nota-se que as amostras de GTX/A reduziram o valor da RTS em aproximadamente 14%, porém o alongamento das amostras degradadas foi superior aos das amostras virgens.

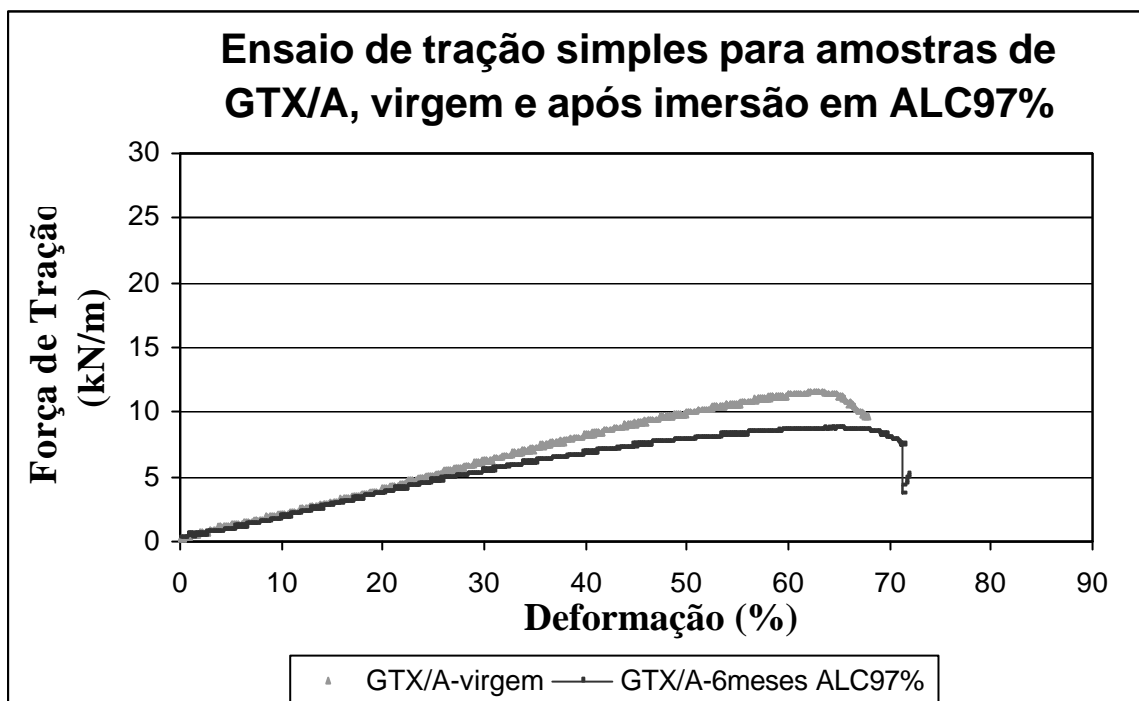


Figura 4.12-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/A virgens e GTX/A degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).

4.4) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/B VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

A composição química das amostras de GTX/B é diferente das demais amostras de GTX. Segundo os fornecedores os GTX/B possuem como polímero principal o polipropileno. Enquanto que os outros GTX estudados nesta pesquisa são predominantemente constituídos de poliéster. Estas características influenciam nos resultados, pois cada polímero reage de maneira diferente quando solicitado, seja mecânica ou quimicamente.

4.4.1) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%

a) Tempos de Imersão: 3 meses

Nota-se na Figura 4.13 que as amostras de GTX/B, após imersão no fluido ALC97% pelo período de 3 meses, perdeu cerca de 24% em Resistência a Tração Simples, quando comparadas às amostras virgens. Percebe-se que o comportamento dessas amostras foi semelhante ao das amostras de GTX/A, nas mesmas condições de ensaio. Cabe lembrar, que essas amostras são de fabricantes diferentes.

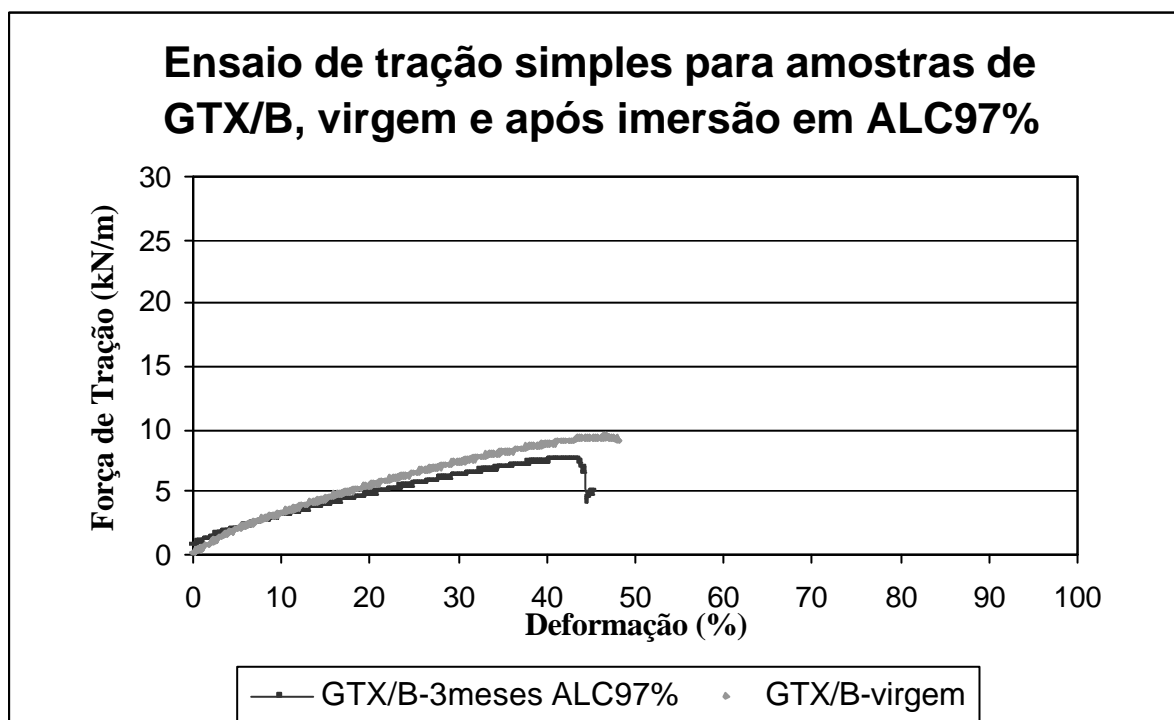


Figura 4.13-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).

b) Tempos de Imersão: 6 meses

A Figura 4.14 apresenta os resultados dos ensaios de RTS nas amostras de GTX/B virgem e após imersão no fluido ALC97% pelo período de 6 meses. A perda de RTS observada nas amostras após o período de imersão citado, também foi de 24%, igual ao valor encontrado para este ensaio para o tempo de 3 meses. Todavia, o alongamento observado para este caso foi superior ao observado para as amostras de GTX/B mostrado anteriormente para o intervalo de imersão de 3 meses.

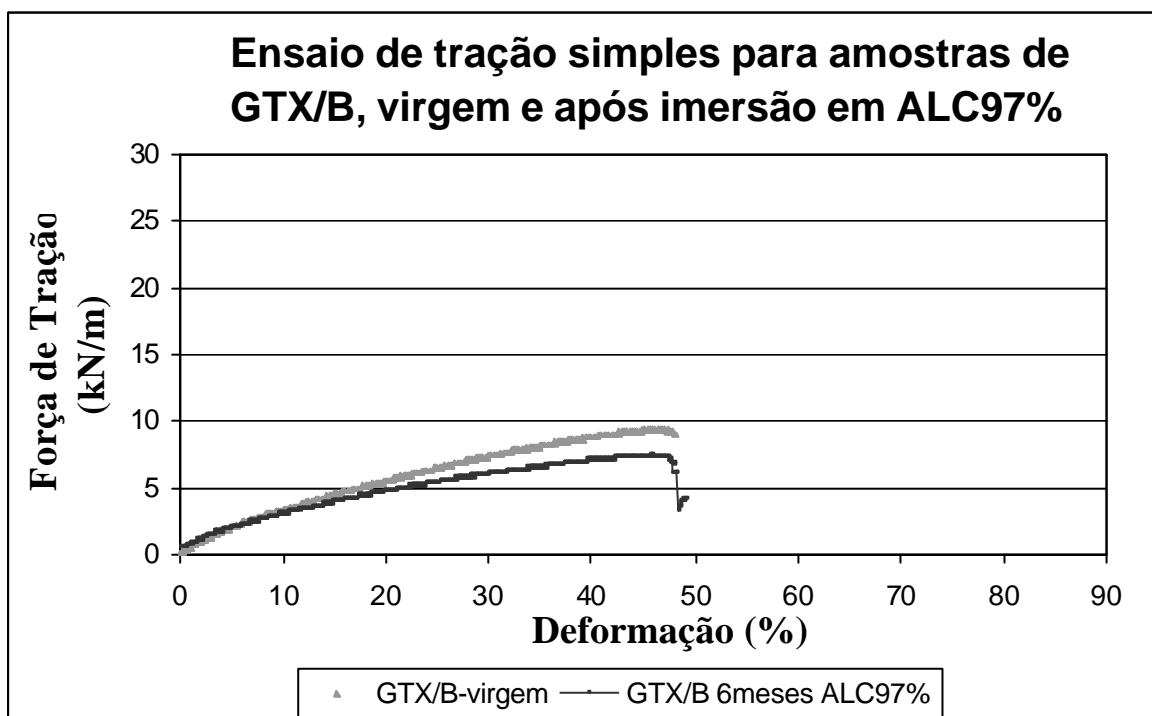


Figura 4.14-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).

4.4.2) FLUIDO AGRESSIVO SC1%

a)Tempo de Imersão: 3 me ses

O comportamento das amostras de GTX/B após imersão em SC1% pelo período de 3 meses foi mais satisfatório do que os resultados dos ensaios com GTX/A imersos neste mesmo fluido, apresentado na Figura 4.5.

Portanto, faz-se necessário observar os compostos químicos que constituem os geossintéticos antes de indicá-los para as obras de proteção ambiental. Sabe-se que estas obras requerem cuidados diferentes daqueles atribuídos às obras que expõem esses materiais sintéticos predominantemente aos esforços mecânicos.

Observa-se na Figura 4.15 que os resultados para as amostras de GTX/B após imersão no fluido SC1% reduziram o valor da RTS em aproximadamente 30%, quando comparadas com as amostras virgens.

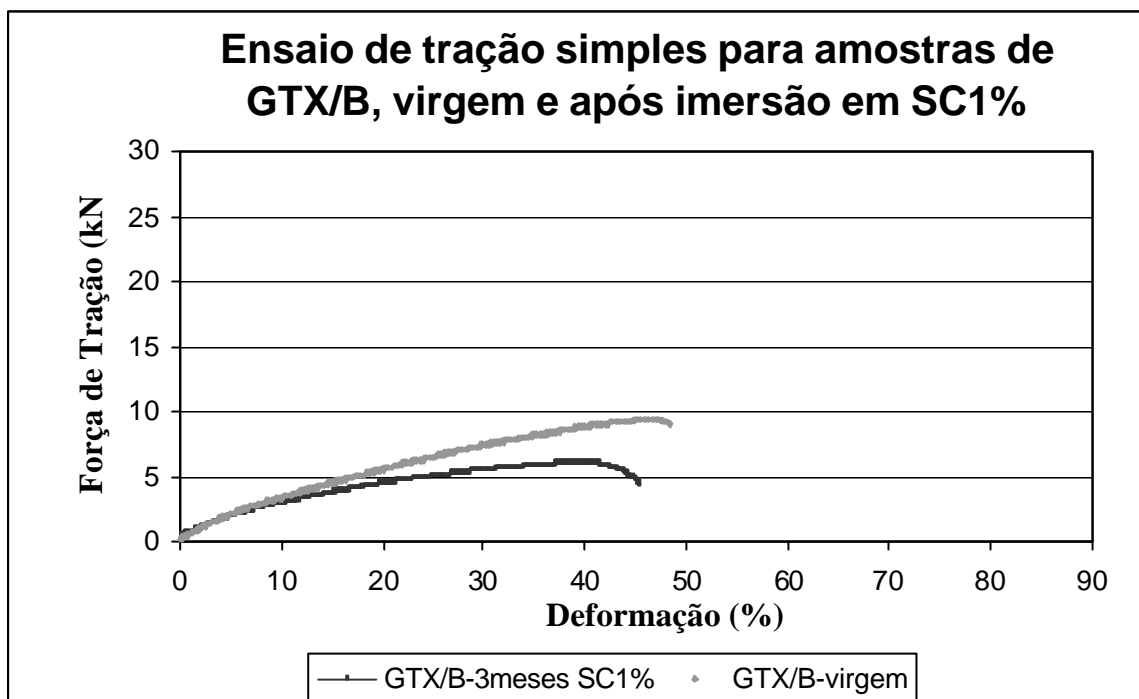


Figura 4.15-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).

b) Tempo de Imersão: 6 meses

A Figura 4.16 apresenta os resultados observados para as amostras que foram imersas no fluido SC1% pelo período de 6 meses. Nota-se que as amostras mesmo aumentando o tempo de imersão não sofreram grandes perdas de RTS, no entanto o alongamento reduziu satisfatoriamente. Com o passar do tempo, as amostras vão se tornando menos resistentes, provavelmente, devido ao aumento da separação entre os filamentos.

No entanto, mesmo não ocorrendo grandes reduções no valor de RTS nas amostras de GTX/B após imersão no fluido SC1%, pelo período 6 meses, pode-se afirmar que a diminuição no valor do alongamento máximo representa indício de degradação nas amostras.

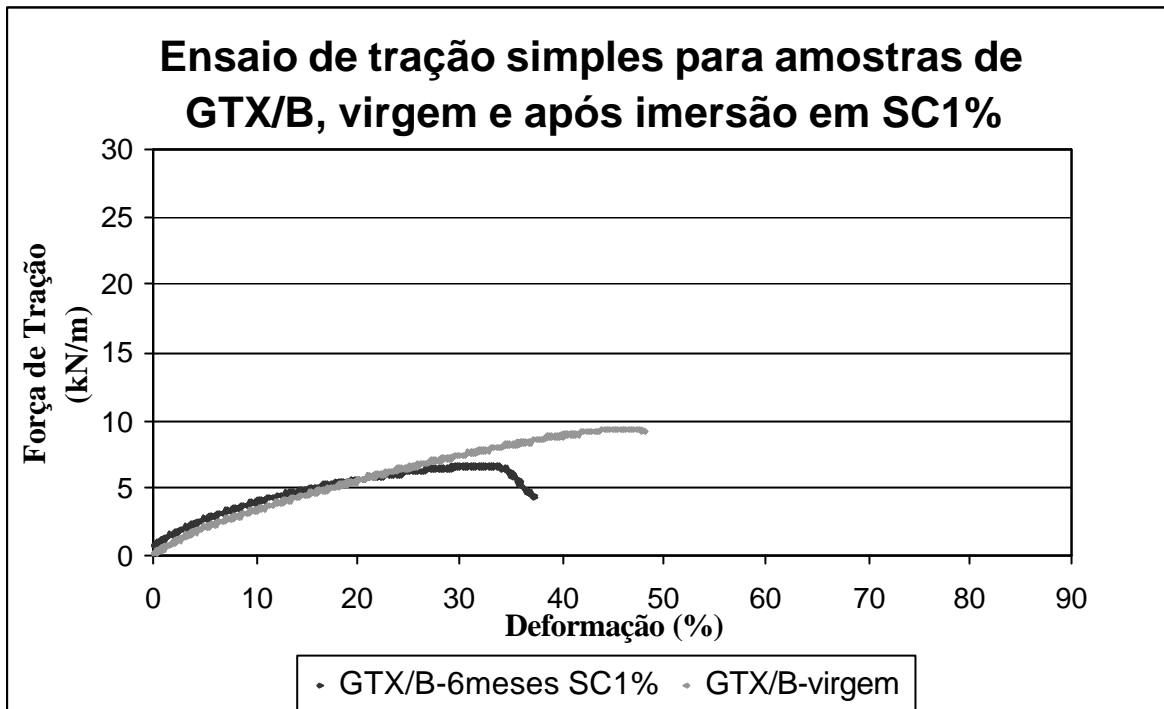


Figura 4.16-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).

b)Tempo de Imersão: 9 meses

A Figura 4.17 confirma a degradação progressiva que ocorre nas amostras de GTX/B após imersão em SC1%, com o passar do tempo. Percebe-se que as amostras degradadas reduziram em cerca de 47% a RTS e 29% o alongamento.

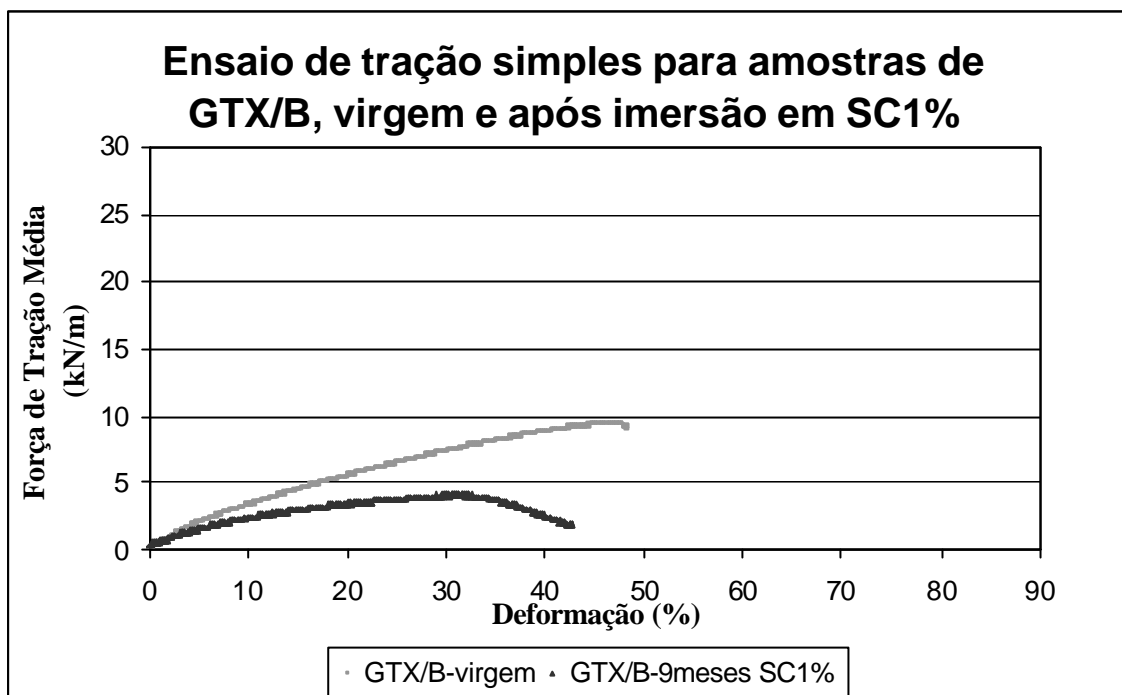


Figura 4.17-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 9 meses).

4.4.3) FLUIDO AGRESSIVO SC3%

a) Tempo de Imersão: 3 meses

Os resultados apresentados na Figura 4.18 mostram que as amostras de GTX/B após serem submetidas ao contato com SC3% pelo período de 3 meses reduziram em aproximadamente 72% a RTS. Cabe salientar, que as amostras de GTX/A não resistiram à imersão neste fluido, as amostras degradaram-se completamente antes de completar o tempo do ensaio.

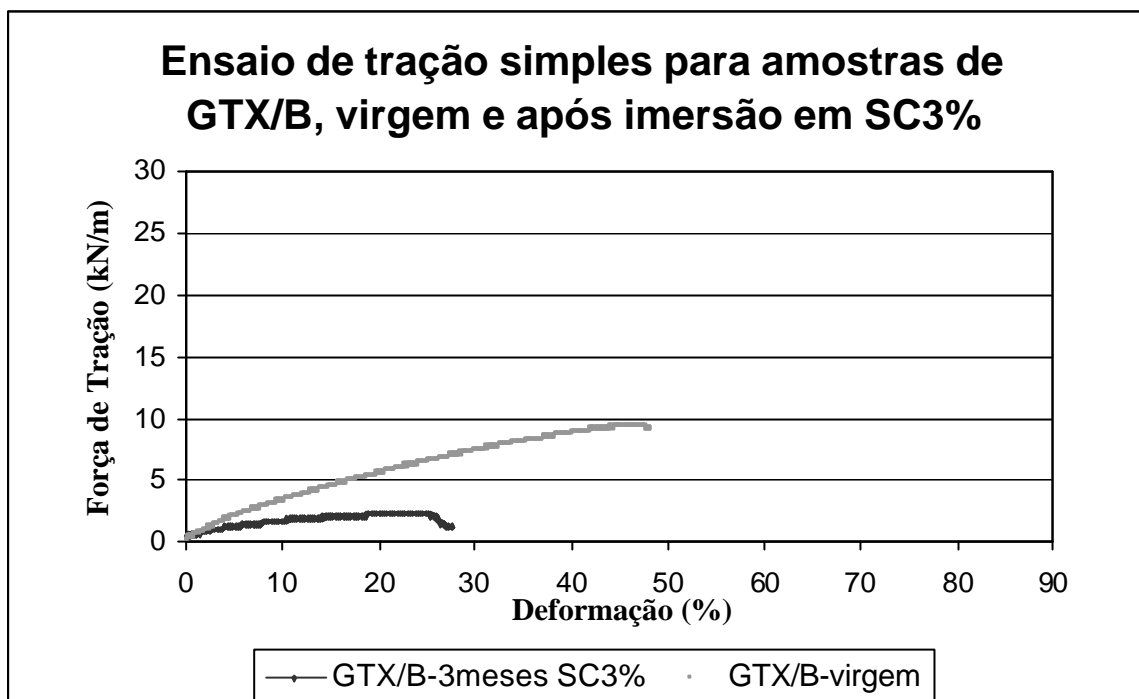


Figura 4.18-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/B virgens e GTX/B degradadas após imersão em SC3% (Tempo de imersão: 3 meses).

Pode-se afirmar que amostras de GTX/B ou GTX/A submetidas ao contato ou imersão em fluidos que contenham proporções maiores ou iguais a 1% de soda cáustica estarão sujeitas a degradações que comprometem a segurança das obras de proteção ambiental.

Comparando os resultados dos dois tipos de amostras nota-se que as amostras de GTX/B são mais eficazes do que as amostras de GTX/A, para estas condições de ensaio.

4.5) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/D VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

Devido os geotêxteis (GTX), com exceção do GTX/B, possuírem mesma composição química (polímero predominante = poliéster), variando apenas em gramatura, decidiu-se nesta etapa da pesquisa executar ensaio para tempos maiores e assim o trabalho não se tornar repetitivo.

4.5.1) FLUIDO AGRESSIVO GSC

a) Tempos de Imersão: 6 e 12 meses

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados dos ensaios de RTS realizados em amostras de GTX/D virgens e amostras de GTX/D após a retirada da imersão do fluido GSC pelos períodos supracitados. Observa-se que ocorreram reduções de resistência à tração simples nas amostras que foram submetidas ao contato com o fluido, estas reduções foram em torno de 10% para os dois tempos de ensaio. Pode-se afirmar que a diferença encontrada entre esses resultados foi na capacidade de deformação, para o tempo de 12 meses a porcentagem da deformação foi inferior àquele observada nas amostras que ficaram imersas pelo período de 6 meses.

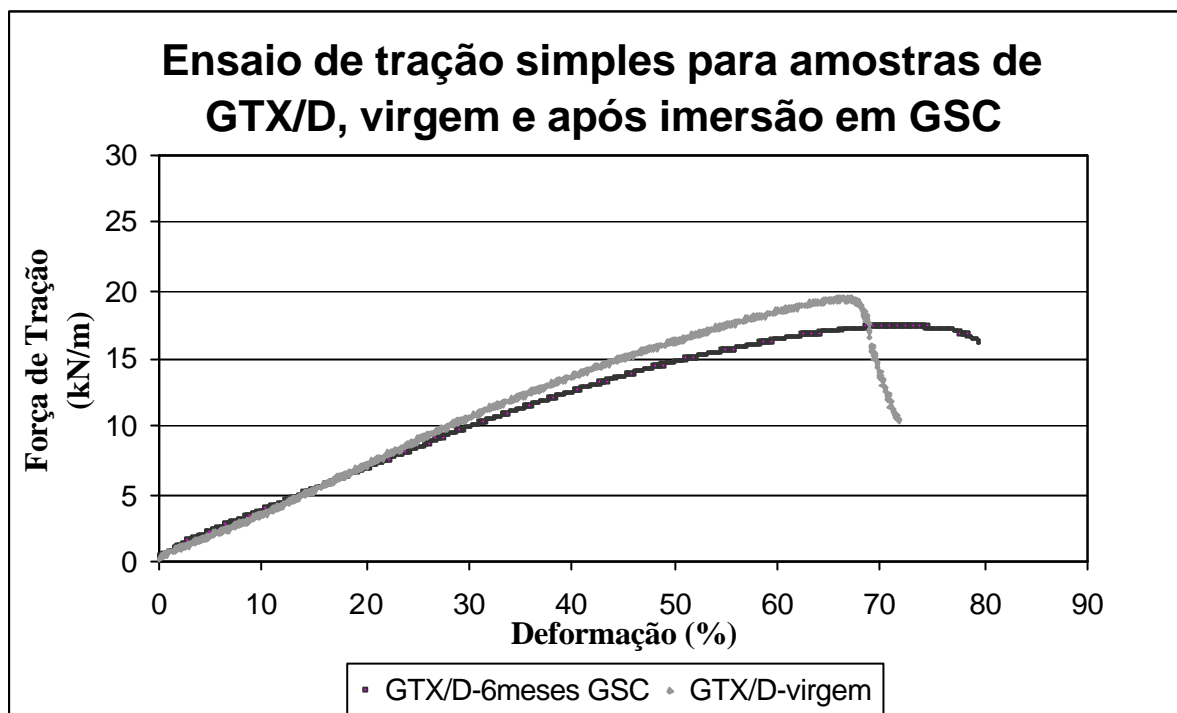


Figura 4.19-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 6 meses).

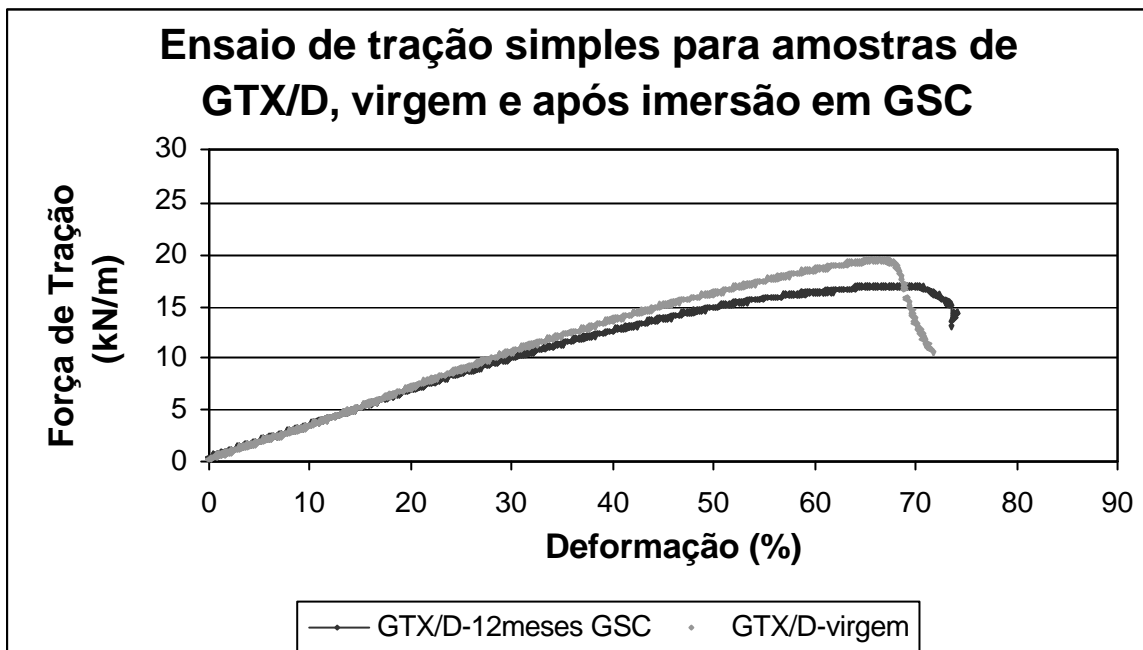


Figura 4.20-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 12 meses).

4.5.2) FLUIDO AGRESSIVO SC 1%

a) Tempos de Imersão: 3 e 6 meses

A Figura 4.21 apresenta os resultados que foram realizados com amostras de GTX/D virgens e amostras que permaneceram em imersão pelo período de 3 meses no fluido SC1%, observa-se que as amostras após imersão perderam significativamente (75%) resistência à tração e alongamento (deformação).

O fluido SC1% degradou as amostras de maneira gradativa, foram realizadas análises visuais e tácteis semanalmente e notou-se que os GTX em contato com este fluido perderam completamente a capacidade de absorver qualquer tipo de solicitação.

Nota-se na Figura 4.22 que com o acelerar do tempo de imersão as amostras tornaram-se bastante frágeis. As perdas de resistência à tração nas amostras de GTX/D após imersão pelo período de 6 meses foram em torno de 93% e as reduções nas porcentagens de deformação foram aproximadamente 57%, em relação às amostras virgens.

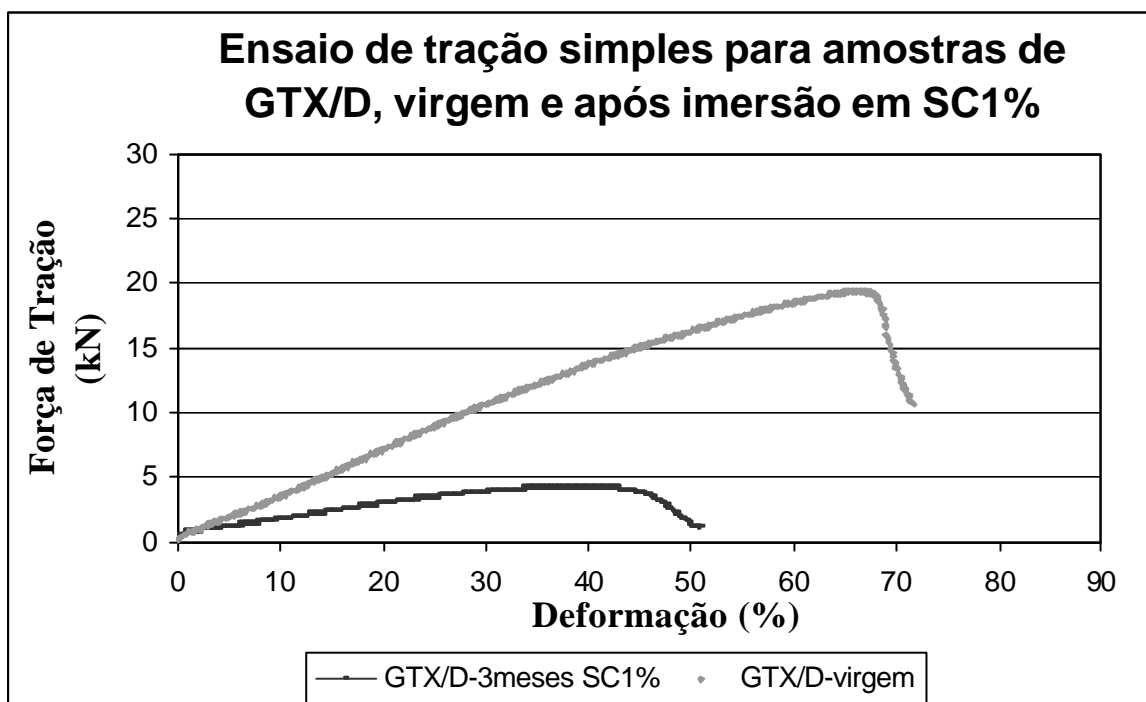


Figura 4.21-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).

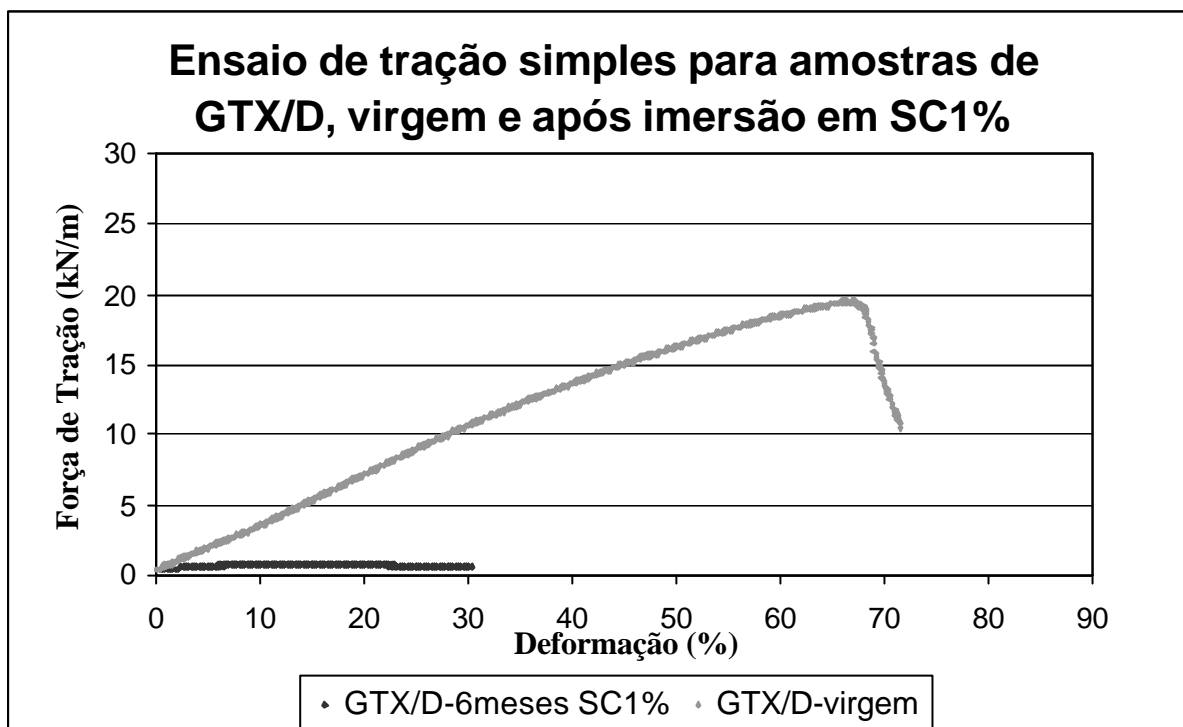


Figura 4.22-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).

b) Tempos de Imersão: 9 e 12 meses

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram que as amostras de GTX/D com o aumento do tempo de imersão no fluido agressivo SC1% degradam-se por completo. Após o período de 12 meses de imersão perderam completamente a forma. A presença deste fluido em contato com os GTX/D proporcionou o rompimento completo dos filamentos dos GTX, o aspecto observado foi de que as amostras tornaram-se uma espécie de pó em suspensão no fluido.

O aspecto das amostras de GTX após imersão pelo período de 24 meses foi semelhante àquele observado para as amostras que ficaram imersas pelo tempo de 12 meses. Observaram-se amostras completamente degradadas.

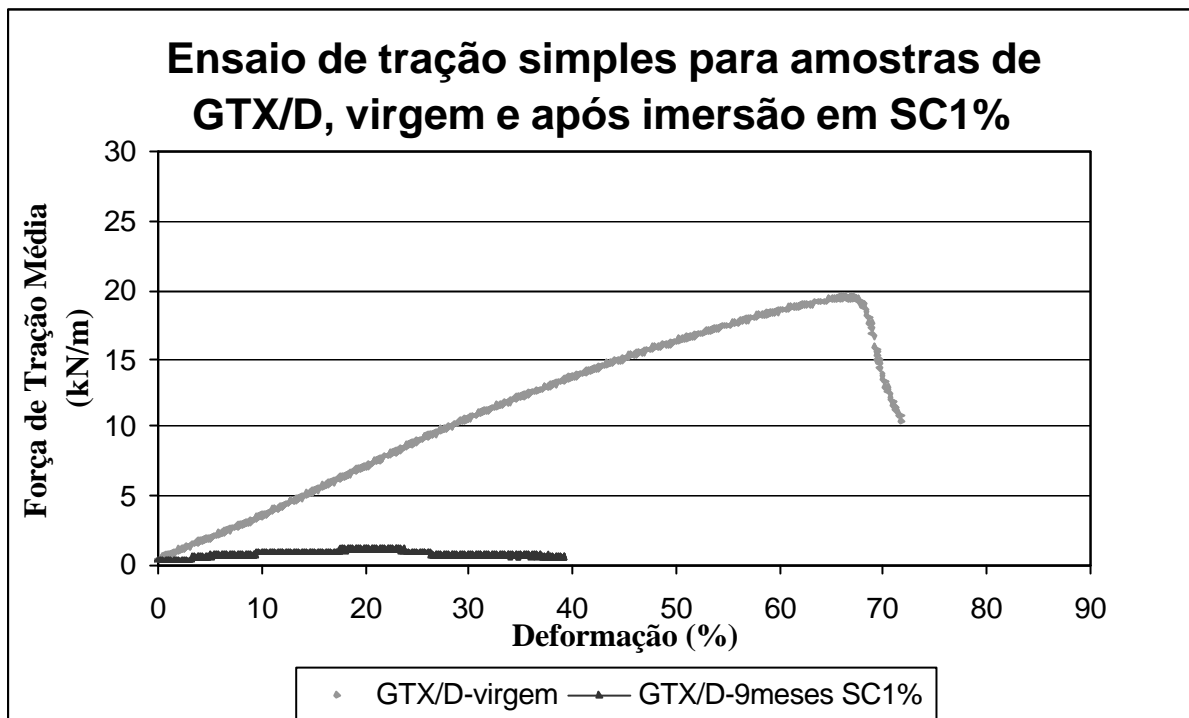


Figura 4.23-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 9 meses).

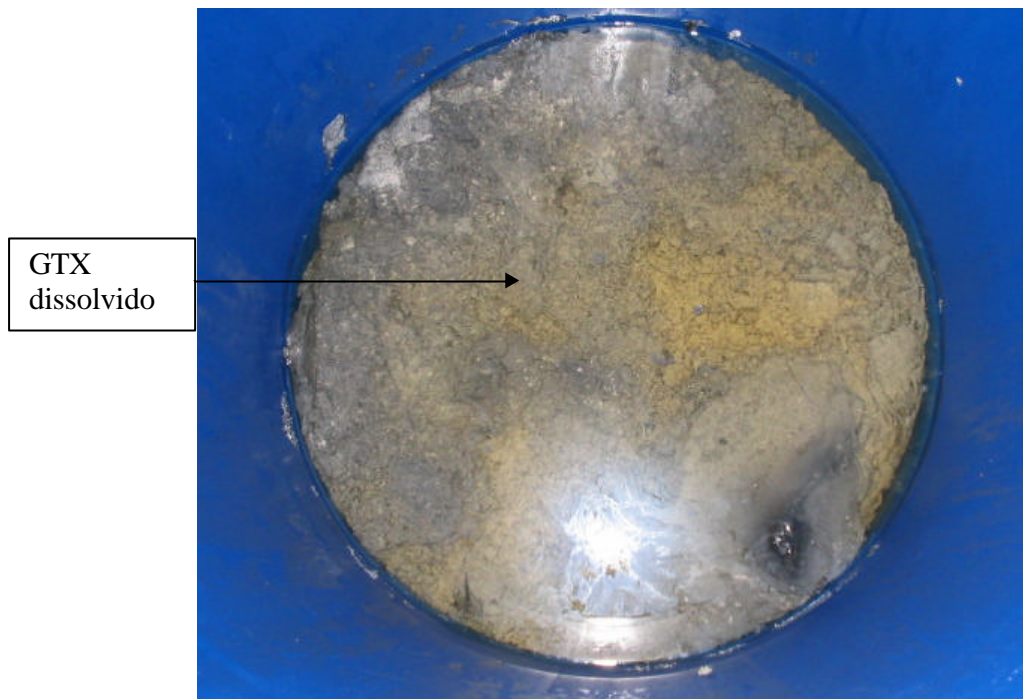


Figura 4.24-Aspecto do GTX após 12 meses de imersão em SC1%.

4.5.3) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%

a) Tempo de Imersão: 3 e 6 meses

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à tração simples em amostras de GTX/D virgens e amostras que ficaram imersas no fluido ALC97% pelos tempos de 3 e 6 meses, respectivamente. Observa-se que os GTX/D reduzem em torno de 40% a resistência quando submetidos a imersão no fluido agressivo pelo período de 3 meses. Enquanto que, para o tempo de 6 meses as amostras perdem um pouco menos no valor da resistência à tração (10%). Porém, após o pico de valor máximo de resistência, as amostras rompem com maior rapidez. Este fenômeno foi observado para a maioria dos casos estudados.

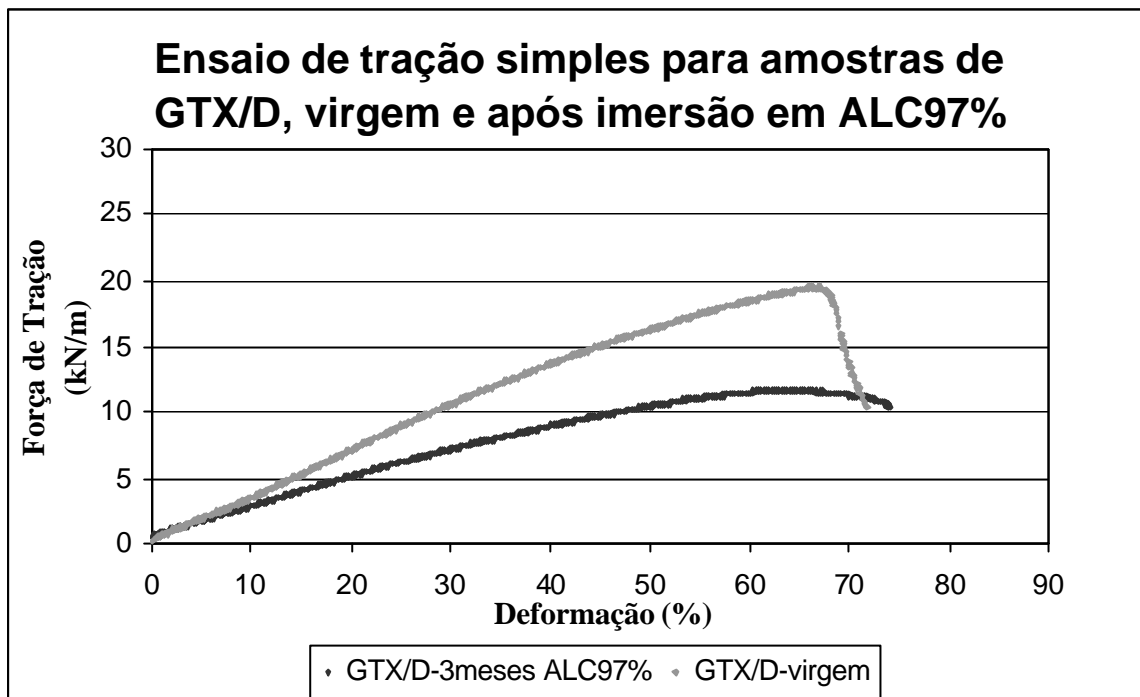


Figura 4.25-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).

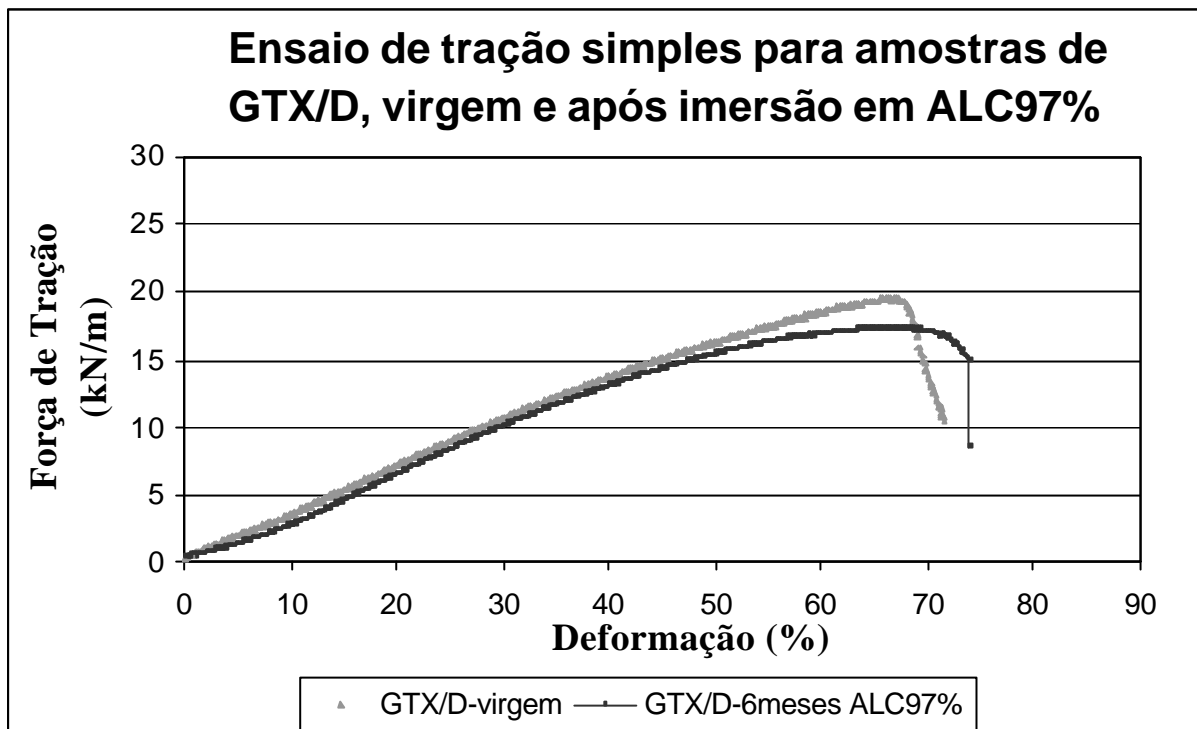


Figura 4.26-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/D virgens e GTX/D degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses)

4.6) COMPARAÇÃO ENTRE AMOSTRAS DE GTX/E VIRGEM E APÓS IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

4.6.1) FLUIDO AGRESSIVO GSC

a)Tempo de Imersão: 3 meses

Os resultados observados na Figura 4.27 são de amostras de GTX/E virgens e amostras de GTX/E após imersão no fluido GSC, pelo período de 3 meses. Observam-se reduções da resistência à tração simples nas amostras após imersão. Este comportamento, para os primeiros tempos de degradação, é semelhante aos outros tipos de GTX que foram estudados neste trabalho. A diminuição observada para RTS neste caso foi de 28%.

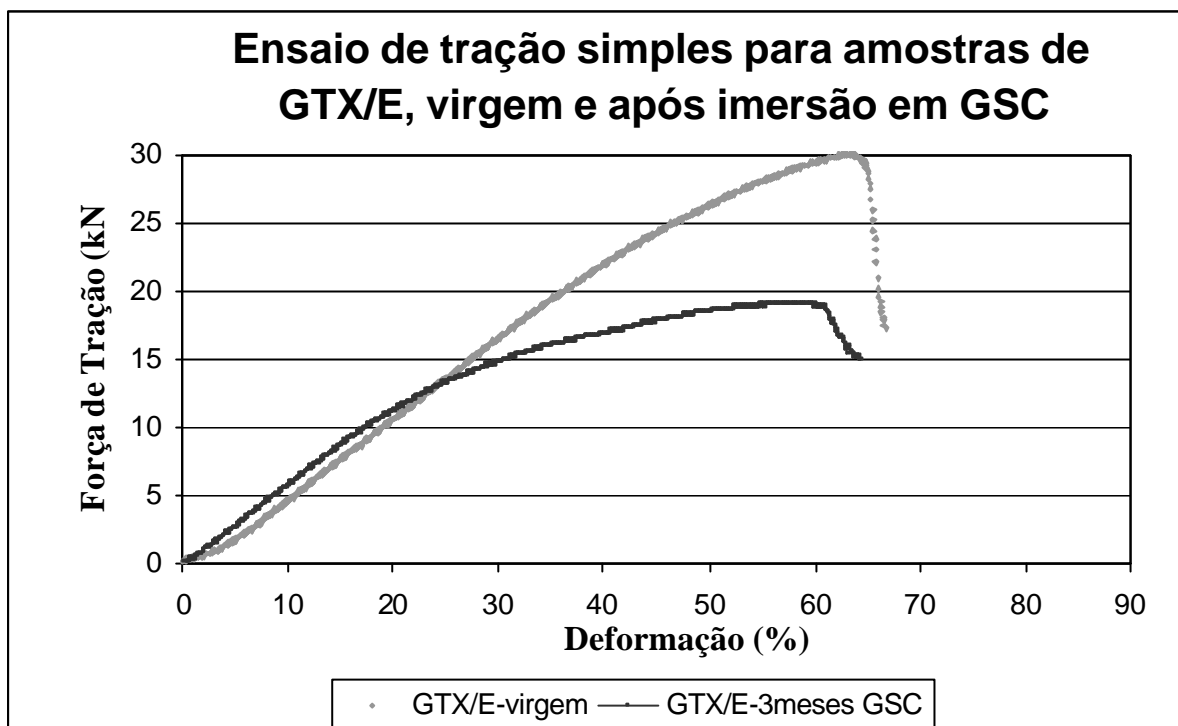


Figura 4.27-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em GSC (Tempo de Imersão: 3 meses).

b)Tempo de Imersão: 6 meses

A Figura 4.28 apresenta os resultados dos ensaios de RTS para amostras de GTX/E virgens e após imersão de 6 meses no fluido GSC, percebe-se que não ocorreram grandes diferenças no comportamento das amostras após a imersão, quando comparadas às amostras que ficaram imersas pelo tempo de 3 meses. As reduções no valor de RTS, para este caso, foram em torno dos 19%.

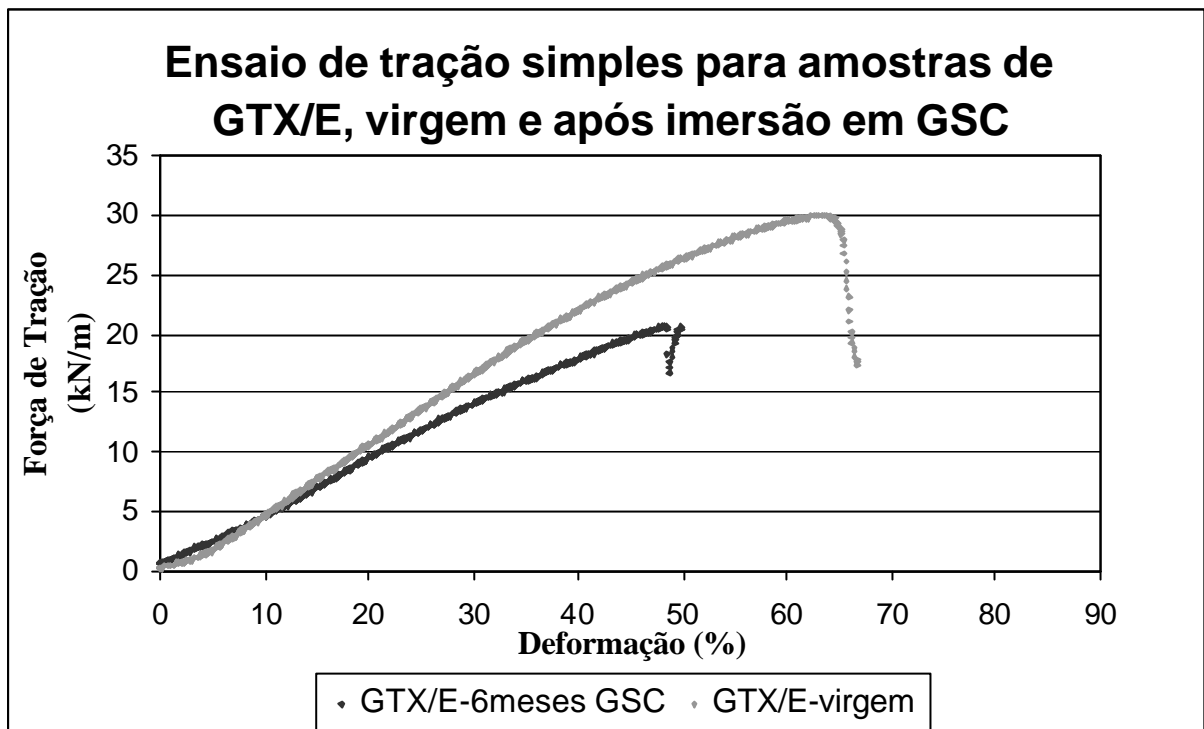


Figura 4.28-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 6 meses).

c)Tempo de Imersão: 12 meses

Observa-se na Figura 4.29 que as amostras de GTX/E, com o aumento do tempo de imersão no fluido GSC, não alteraram significativamente no valor da RTS, quando comparadas ao tempo anterior (6 meses). Nota-se que a resistência das amostras degradadas permaneceram em torno dos 19%.

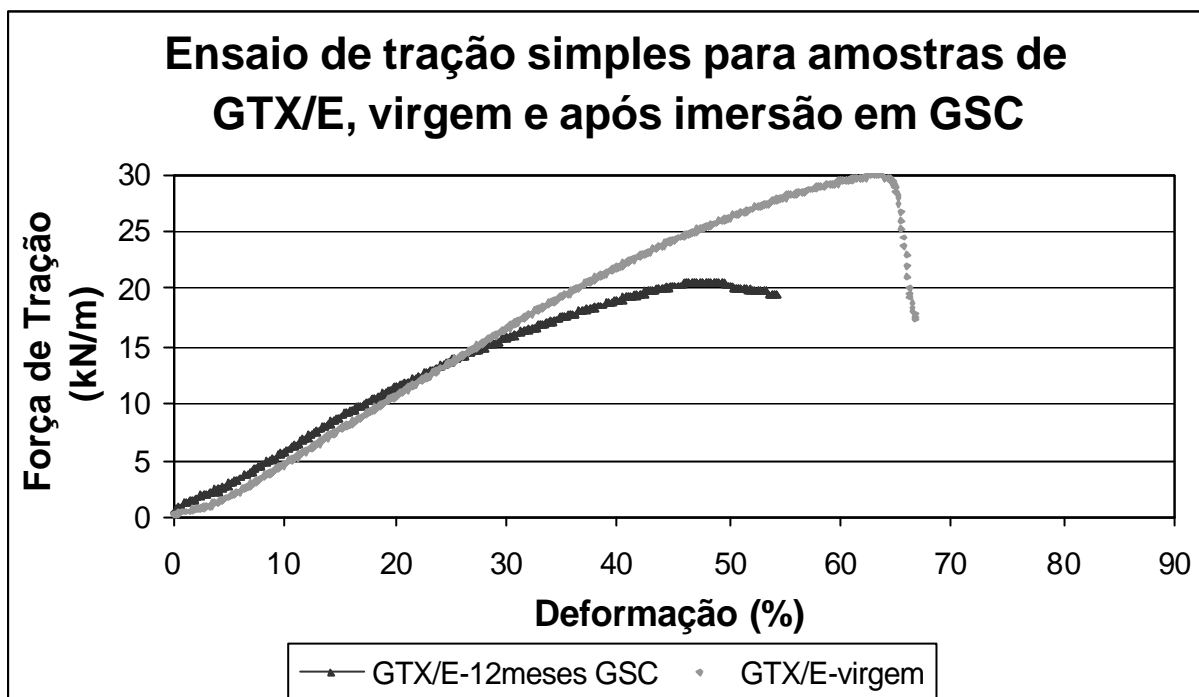


Figura 4.29-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em GSC (Tempo de imersão: 12 meses).

4.6.2) FLUIDO AGRESSIVO SC1%

a) Tempos de Imersão: 3 e 6 meses

Observa-se nas Figuras 4.30 e 4.31 que as amostras de GTX/E, com o aumento do tempo de imersão no fluido SC1% reduzem em até 91% a resistência à tração simples, para o caso de imersão pelo tempo de 6 meses e 67% para o tempo de 3 meses. Percebe-se degradação gradativa ao longo do tempo.

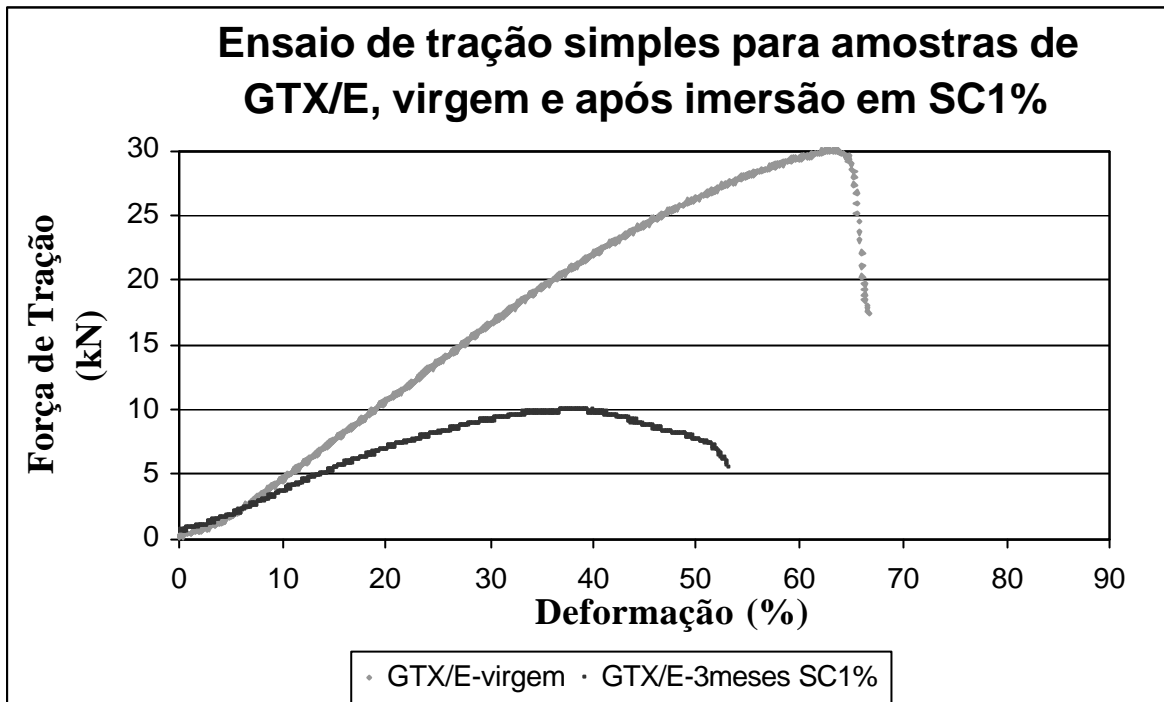


Figura 4.30-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 3 meses).

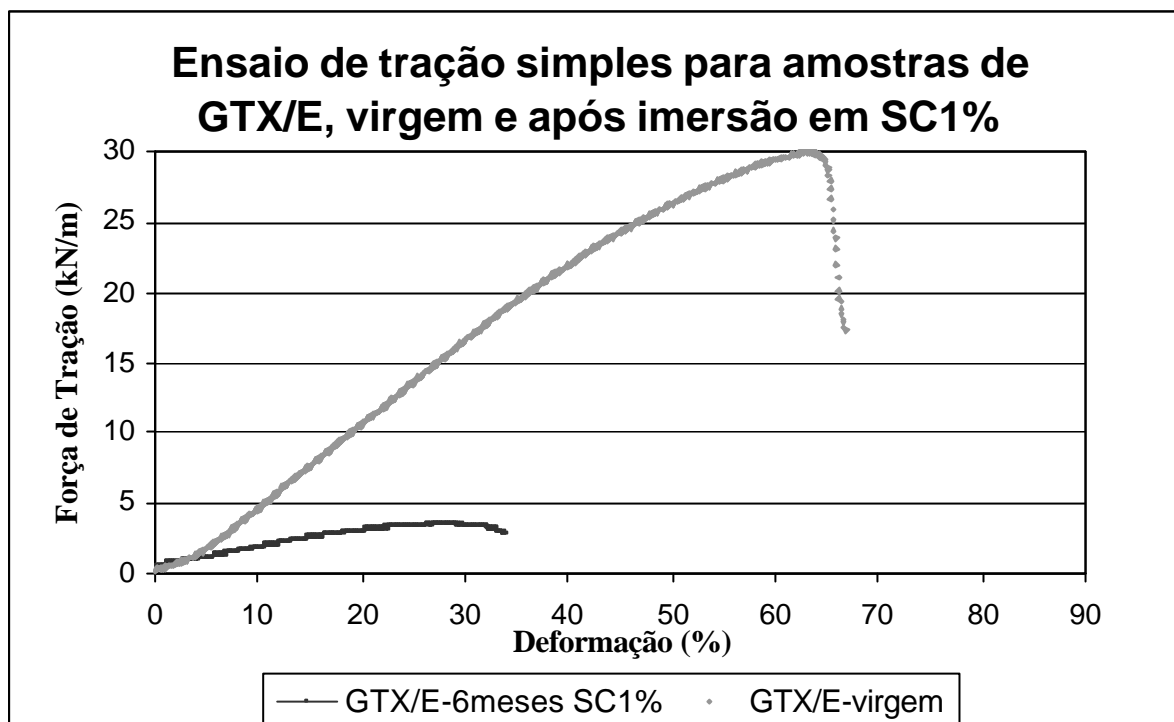


Figura 4.31-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 6 meses).

b) Tempos de Imersão: 9 e 12 meses

Caber lembrar que as amostras de GTX/E degradaram-se completamente após 9 meses de imersão. Por este motivo, não foram realizados ensaios de RTS nestas amostras, para o tempo de 12 meses.

Percebe-se na Figura 4.32 que as amostras tiveram um ganho *aparente* de RTS, como ocorreu para a maioria das amostras indicando início de alteração na composição das amostras.

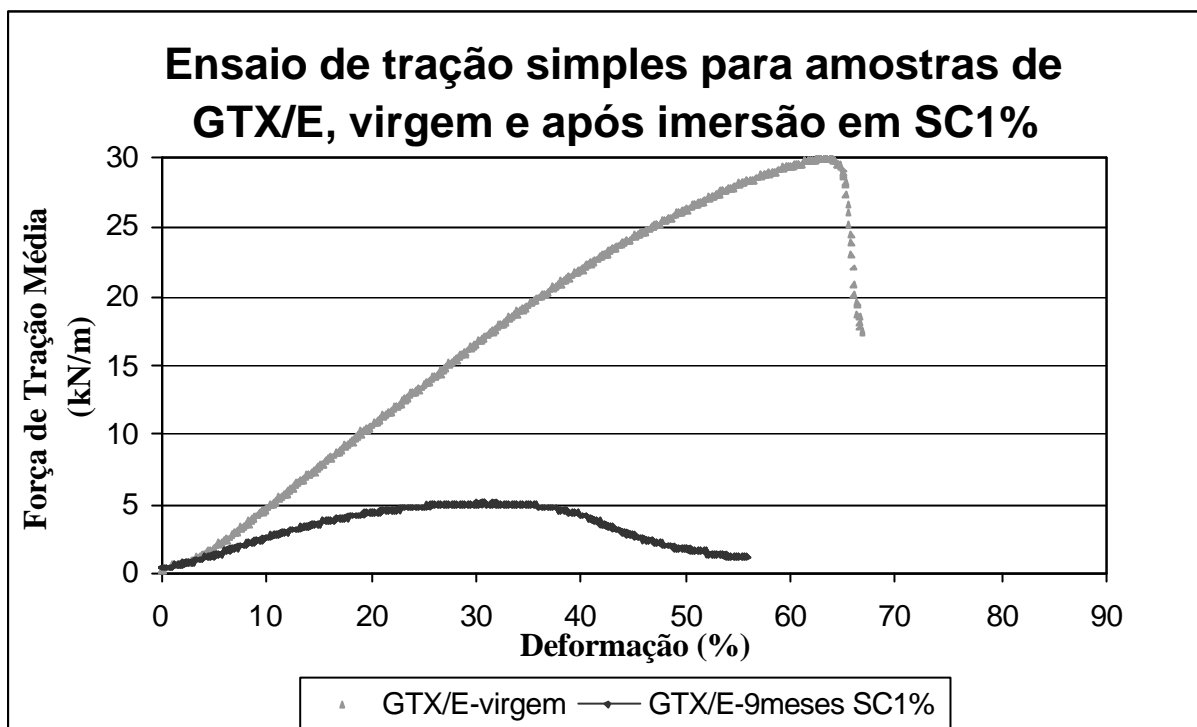


Figura 4.32-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em SC1% (Tempo de imersão: 9 meses).

4.6.3) FLUIDO AGRESSIVO ALC97%

a)Tempo de imersão: 3 e 6 meses

As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam os resultados do ensaio de RTS das amostras de GTX/E virgens e após imersão no fluido ALC97% pelos tempos de 3 e 6 meses, respectivamente.

As amostras que permaneceram imersas pelo tempo de 6 meses comparadas com as que permaneceram em imersão pela metade deste tempo também apresentaram reduções no valor da RTS. Segundo inspeção táctil-visual nas amostras degradadas percebeu-se que ocorreram aumentos na espessura das amostras, os filamentos dos GTX/E ficaram mais volumosos. Este fenômeno pode ter proporcionado o aumento de resistência observado, com o acréscimo do tempo de imersão.

Após o tempo de imersão de 3 meses, as amostras apresentaram maiores reduções no valor da RTS quando comparadas com os resultados de RTS para o dobro deste tempo.

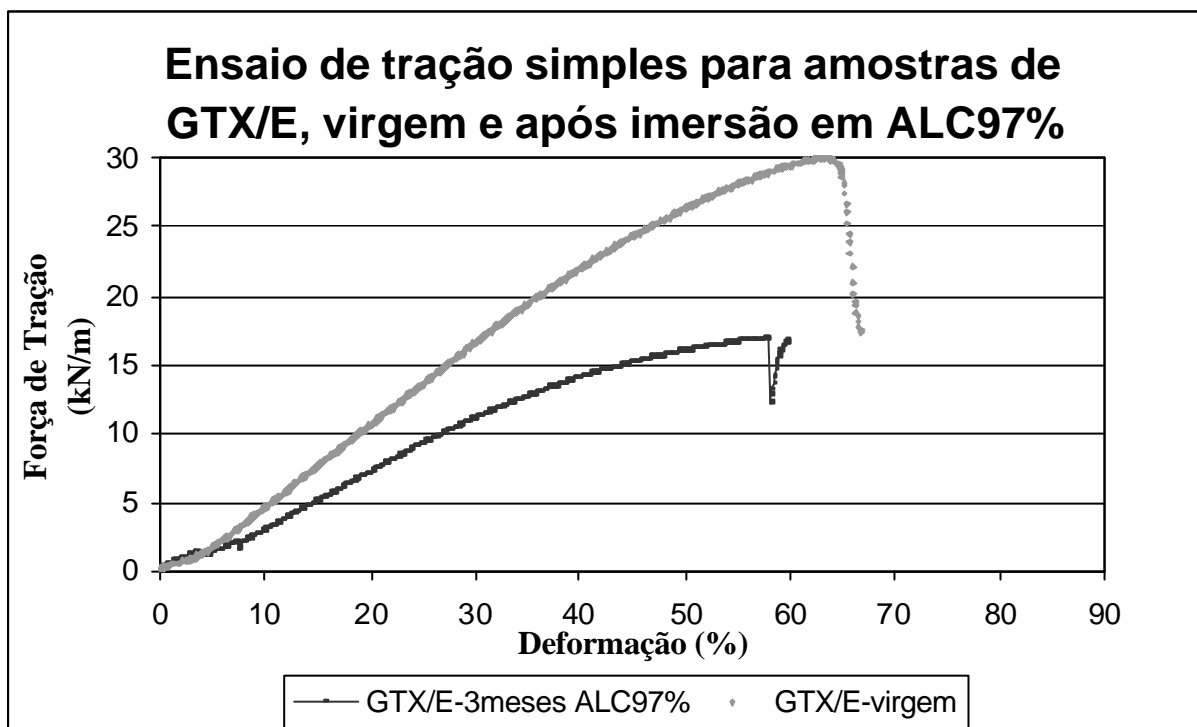


Figura 4.33-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 3 meses).

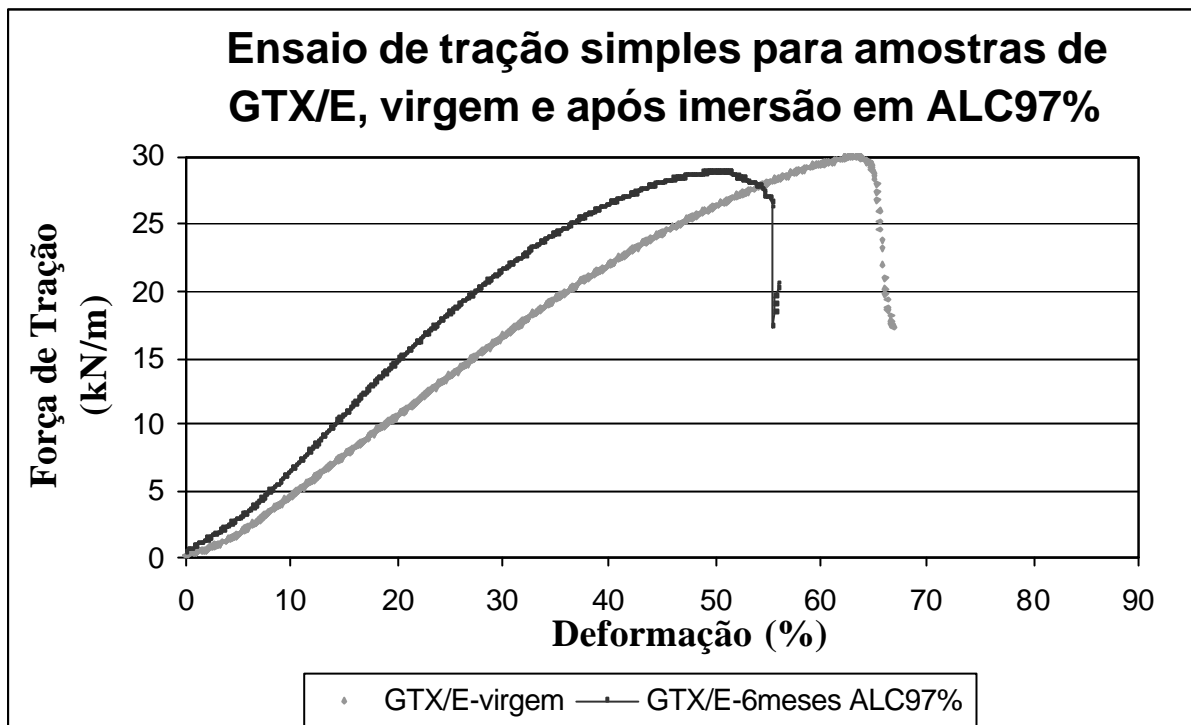


Figura 4.34-Comparação entre os resultados dos ensaios de RTS em amostras de GTX/E virgens e GTX/E degradadas após imersão em ALC97% (Tempo de imersão: 6 meses).

4.7) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG EM AMOSTRAS VIRGENS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA EM GEOTÊXTEIS (GTX) QUE PERMANECERAM EM IMERSÃO NO FLUIDO GSC

As Figuras 4.35 e 4.36 são as curvas termogravimétricas obtidas nos ensaios de Termogravimetria (TG) e as Figuras 4.37 e 4.38 são as curvas derivadas das termogravimétricas; essas curvas apresentam com maior nitidez os pontos de maiores perdas de massa observado nas amostras. Esses resultados são para os geotêxteis GTX/A e GTX/B, ambos com gramatura de 200g/m², virgens e após imersão em gasolina comum, cabendo lembrar que esses materiais são de diferentes fabricantes, com predominância de diferentes polímeros (GTX/A = Poliéster e GTX/B = Polipropileno).

Percebe-se nas Figuras 4.35 e 4.36 que para os geotêxteis GTX/A, as curvas mostram que as amostras virgens apresentaram perdas de massa significativas em torno dos 380°C, enquanto que as amostras degradadas demonstraram perdas de massa em aproximadamente 120°C. Porém, as maiores perdas tanto para amostras virgens como para amostras degradadas ocorreu em torno dos 370°C. Percebe-se que a presença da gasolina impregnada às amostras realmente proporciona mudanças no comportamento desses materiais.

Nas Figuras 4.37 e 4.38 observam-se os resultados dos ensaios de TG para as amostras de GTX/B. Para as amostras virgens, nota-se que os resultados de perda de massa foram bastante semelhantes ao observado para as amostras de GTX/A. As maiores perdas ocorreram em torno do 380°C. No entanto, para as amostras degradadas, as perdas de massa iniciaram-se em torno dos 200°C, permanecendo constantes até aproximadamente os 380°C, quando foram iniciadas as maiores perdas.

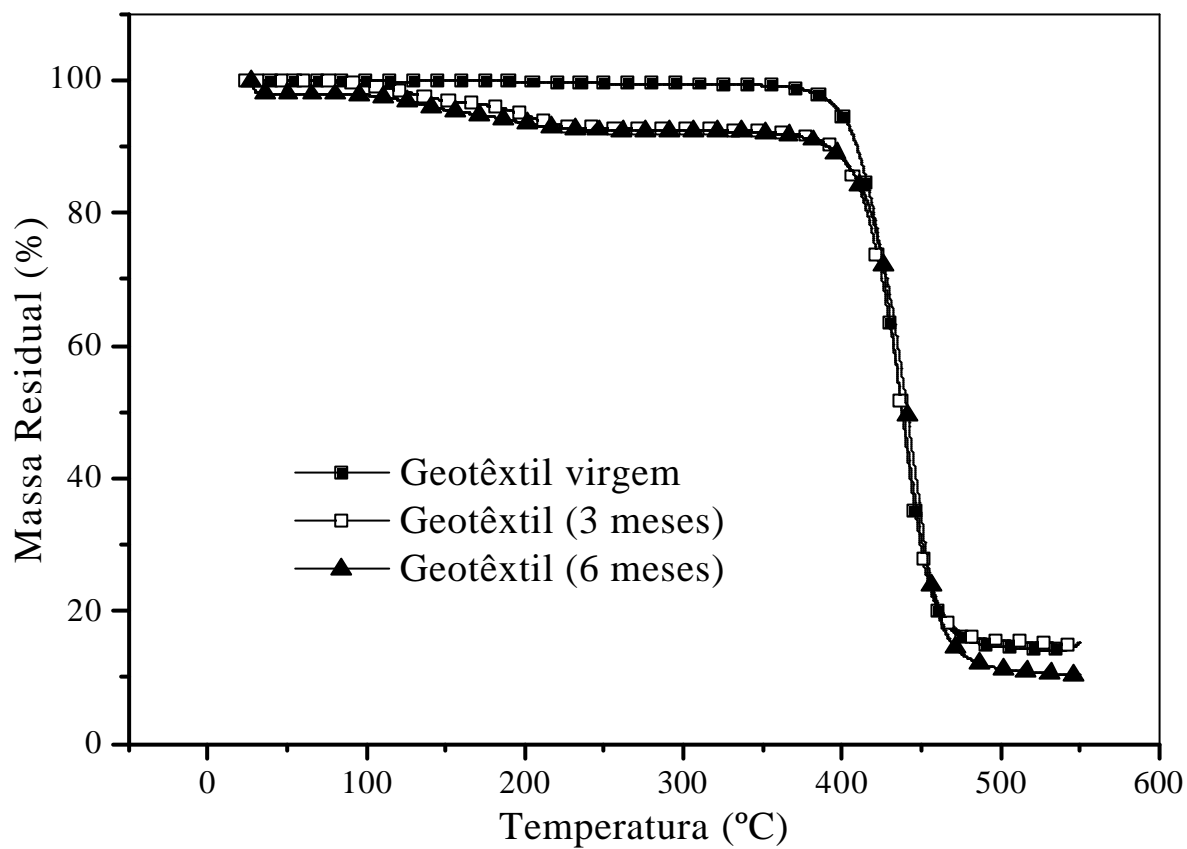


Figura 4.35 – Curvas TG das amostras de GTX/A ($\mu = 200\text{g/m}^2$) após imersão em GSC.

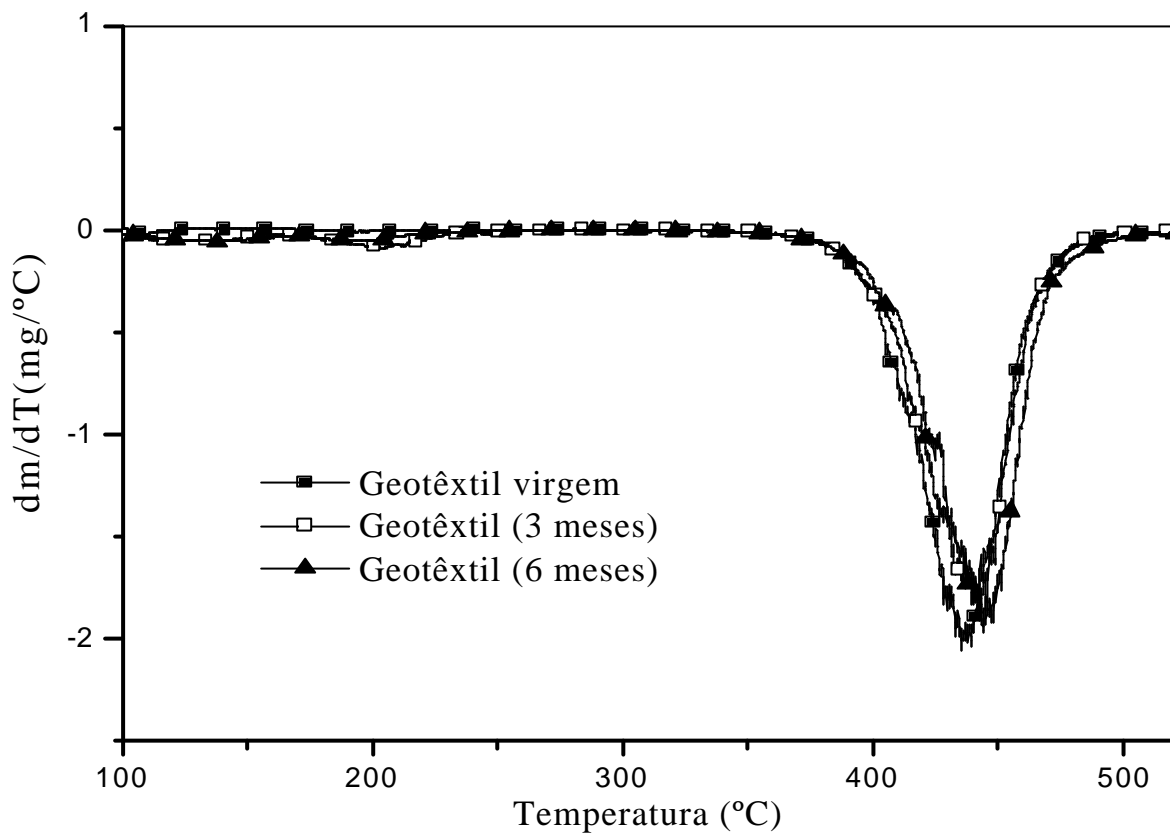


Figura 4.36 – Curvas DTG para amostras de geomembranas de geotêxteis (GTX/A) ($\mu = 200\text{g/m}^2$) virgem e após imersão em GSC.

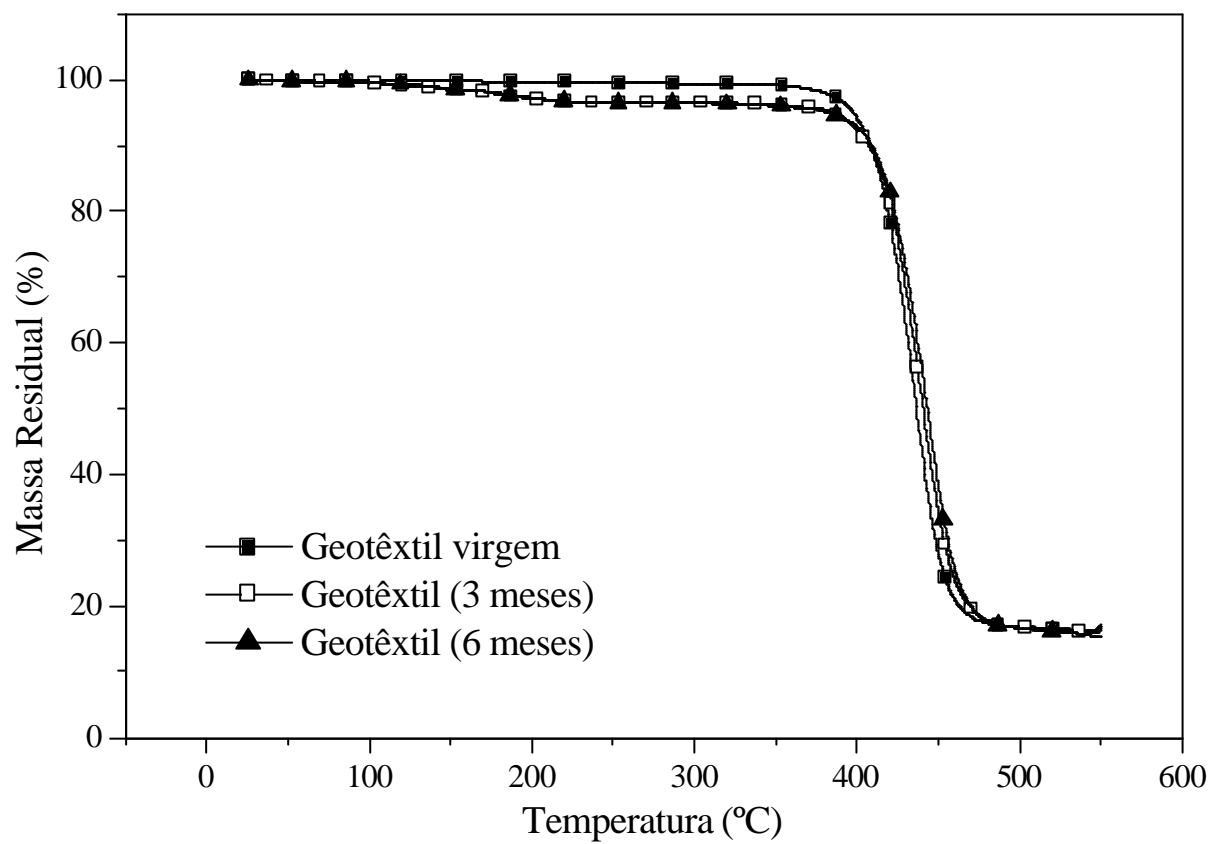


Figura 4.37 – Curvas TG das amostras de GTX/B ($\mu = 200\text{g/m}^2$) de outro fabricante após imersão em GSC.

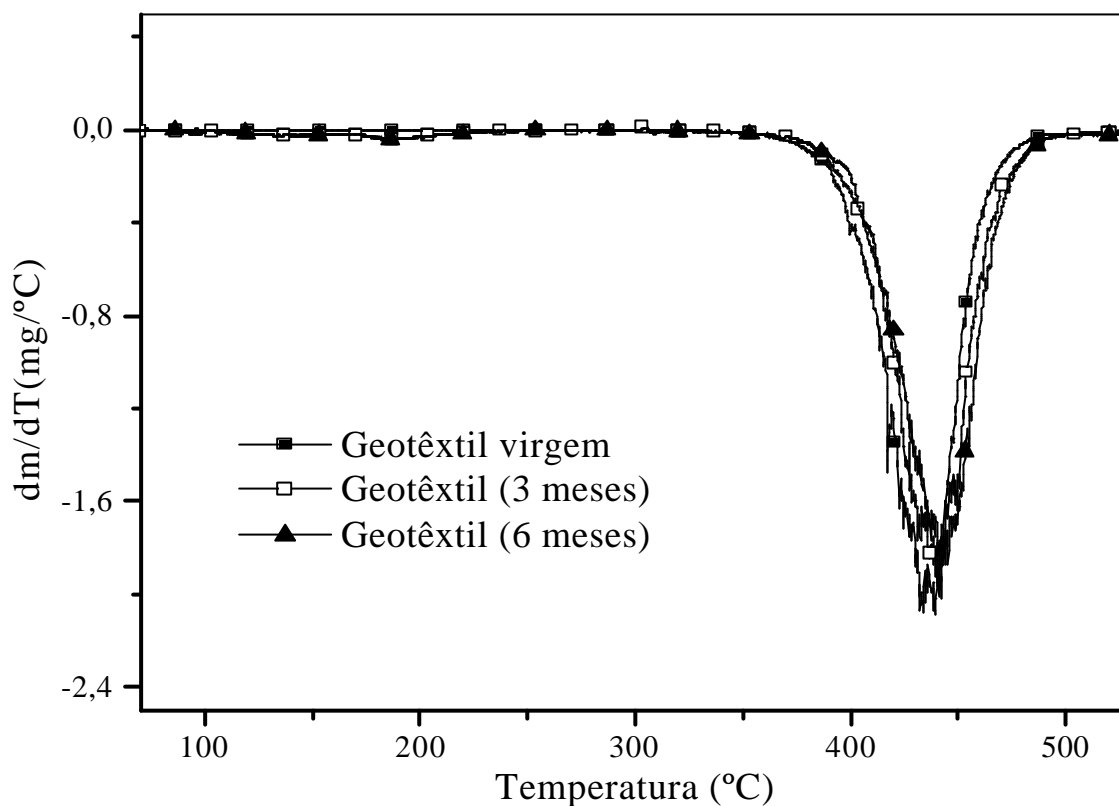


Figura 4.38 – Curvas DTG para amostras de geomembranas de geotêxteis (GTX/B) ($\mu = 200\text{g/m}^2$) virgem e após imersão em GSC.

Esta pesquisa também analisou geotêxteis como gramaturas de 300, 400 e 600 g/m^2 após imersão em gasolina comum, no entanto o comportamento dessas amostras foi semelhante aos dos geotêxteis com 200 g/m^2 (GTX/A). Esses resultados deveram-se às amostras possuírem a mesma composição química, variando apenas em gramatura.

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam as temperaturas de decomposição observadas para o ensaio de TG para geotêxteis com 200 g/m^2 (GTX/A) e 400 g/m^2 (GTX/D). Os resultados, conforme citado anteriormente, foram bastante semelhantes, assim como para todos os outros geotêxteis, com diferentes gramaturas.

Tabela 4.2 - Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GTX/A imersas no fluido GSC.

Amostra	T_{d1} (°C)	Perda de massa (%)
Virgem	437	84
3 meses	439	77
6 meses	445	87

Tabela 4.3 - Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GTX/D imersas no fluido GSC.

Amostra	T_{d1} (°C)	Perda de massa (%)
Virgem	436	83
3 meses	439	83
6 meses	443	84

Em se tratando da imersão de geotêxteis no fluido SC50% foi impossível à realização dos ensaios devido às amostras se degradarem completamente após o contato com esse fluido.

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam o aspecto do geotêxtil após o contato com o fluido SC50%. Constatado que essas amostras não resistiam a esse fluido, foram realizados ensaios com diluições maiores de soda cáustica em água, nas proporções de 30, 20, e 10%. No entanto, o comportamento das amostras de geotêxteis foi o mesmo ao observado para a diluição de 50%. Reduziram-se as diluições para 1, 3 e 5%, observou-se que as amostras degradaram-se de maneira semelhante, porém em intervalos de tempos maiores, chegando até 7 dias sem apresentar degradação visível.

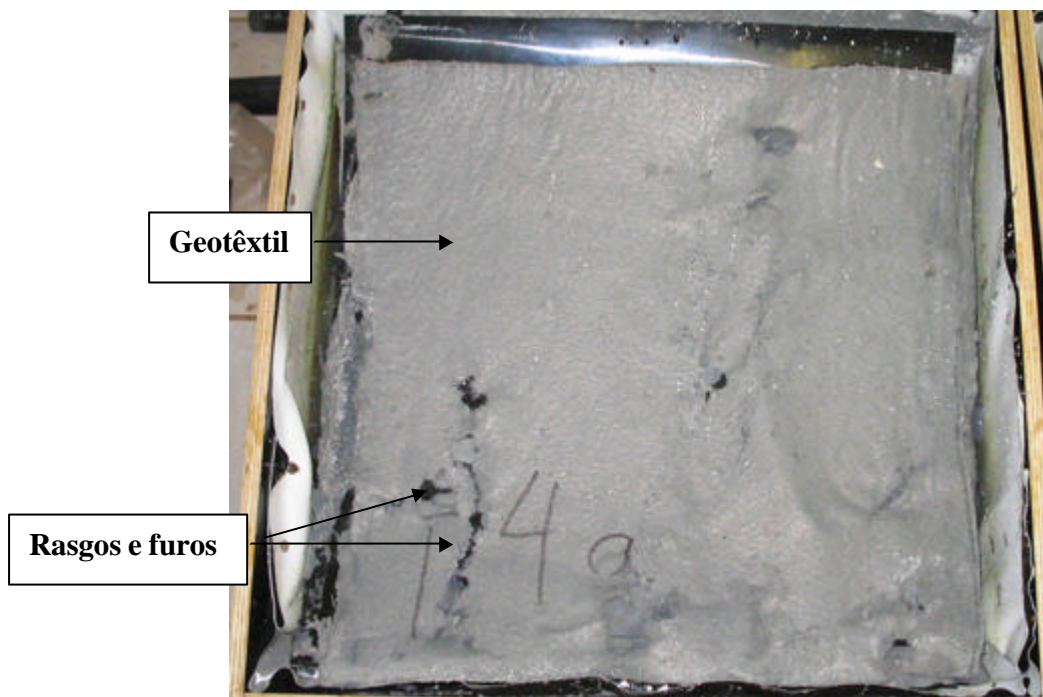


Figura 4.39 – Amostras de geotêxteis armazenadas em caixas de madeira, já com sinais visíveis de degradação.

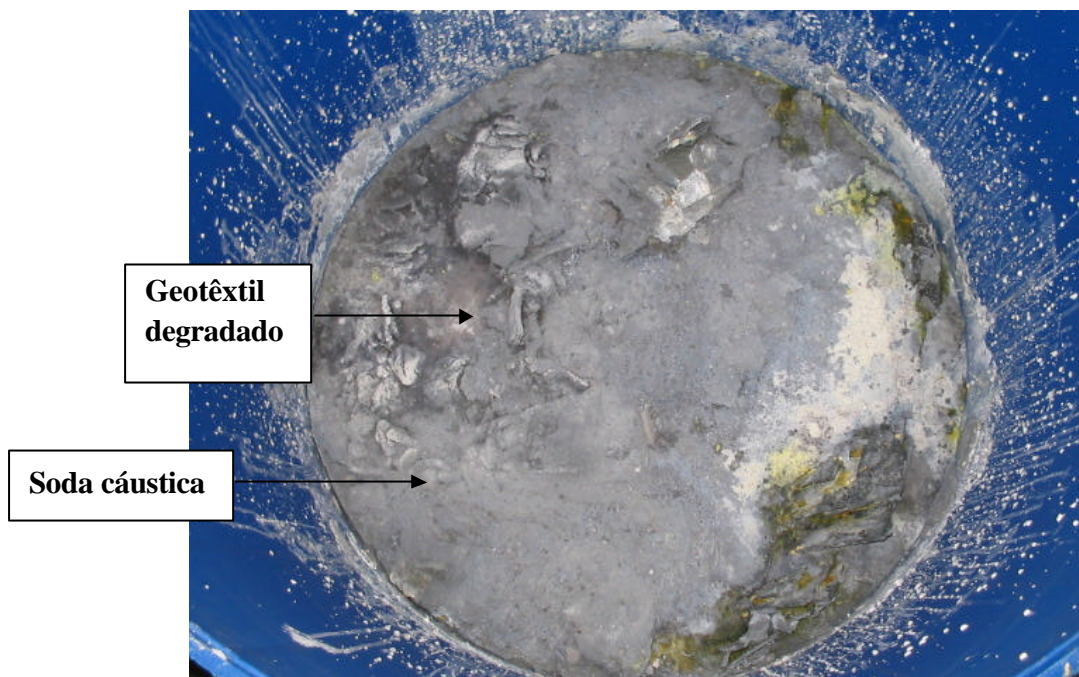


Figura 4.40 – Aspecto dos geotêxteis após imersão de 7 dias em soda cáustica na diluição de 5% (SC5%) em água.

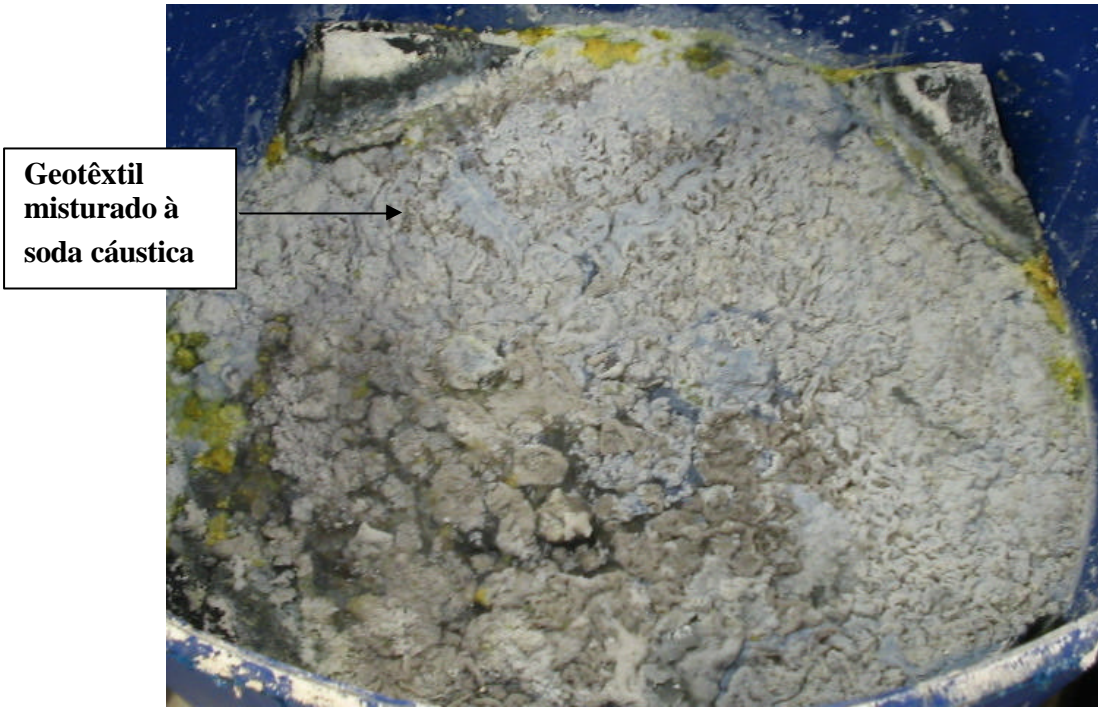


Figura 4.41 – Aspecto dos geotêxteis após imersão de aproximadamente 30 dias em soda cáustica na diluição de 50% em água.

CAPÍTULO V

5) APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE TÁCTIL-VISUAL PARA GEOMEMBRANAS APÓS ENSAIOS TERMOMECÂNICOS

5.1) RESULTADOS DAS REDUÇÕES DE PESOS E DIÂMETROS DAS AMOSTRAS APÓS IMERSÃO EM GASOLINA

5.1.1) Resultados obtidos para Geomembranas GM/A (PVC - 1,0mm)

A Tabela 5.1 apresenta os valores das reduções de massas e diâmetros das amostras de GM/A após imersão no fluido GSC. As medições para esses ensaios foram mensais. Cabe salientar que, as verificações para tempos inferiores a 30 dias não apresentaram diferenças consideráveis entre si.

Observa-se que com o passar do tempo ocorreu a diminuição e enrijecimento das amostras ensaiadas. Inclusive, caso essas amostras fossem retiradas da imersão e expostas ao ar por um tempo de aproximadamente 24h, este enrijecimento tendia a aumentar. Esses fenômenos deram-se possivelmente devido a interações entre os componentes da gasolina (hidrocarboneto) e os componentes das geomembranas, podendo ter ocorrido reações inter e intramoleculares nas amostras.

Segundo Lucas et al. (2001), quando polímeros são postos em contato com um solvente, o primeiro processo que ocorre é o inchamento do polímero, ou seja, o polímero absorve moléculas do solvente, aumentando a massa e o volume. Nesta pesquisa o material polimérico nos primeiros tempos de imersão retraiu, reduzindo massa e volume, deduz-se que ocorreram reações químicas entre a gasolina e as geomembranas que foram capazes de gerar este comportamento. No entanto com o passar do tempo essas reduções foram suavizadas (tempo = 0 mês, massa = 20,82g; tempo = 1 mês, massa = 15,75g e tempo = 12 meses, massa = 19,31g). As

alterações observadas para a massa e o diâmetro das amostras, no período de 12 meses imersas em gasolina comum (GSC) variaram entre 26,2 a 7,9% e em diâmetro entre 9,0 a 2,9%, respectivamente.

Tabela 5.1-Resultados de Massas e Diâmetros das Geomembranas GM/A Imersas em Gasolina Comum.

Tempo de imersão (meses)	M_m (g)	M_m/M_o	Redução de massa (%)	D_m (cm)	D_m/D_o	Redução de diâmetro (%)
1	7,06	0,74	26,15	9,10	0,91	9,00
2	7,50	0,78	21,54	9,11	0,91	8,90
3	7,89	0,83	17,47	9,34	0,93	6,60
4	8,19	0,86	14,33	9,37	0,94	6,30
5	8,31	0,87	13,07	9,54	0,95	4,60
6	8,46	0,88	11,51	9,55	0,95	4,50
7	8,50	0,89	11,09	9,56	0,95	4,40
8	8,50	0,89	11,09	9,62	0,96	3,80
9	8,53	0,89	10,77	9,58	0,96	4,02
10	8,64	0,90	9,62	9,61	0,96	3,90
11	8,72	0,91	8,78	9,68	0,98	3,20
12	8,80	0,92	7,94	9,71	0,97	2,90

Nota: Massa Inicial das Amostras (M_o) = 9,56g; Diâmetro Inicial das Amostras (D_o) = 10cm.

M_m = Massa das Amostras Medida no Mês; D_m = Diâmetro das Amostras Medido no Mês.

A Figura 5.1 apresenta amostras de geomembranas para o período de 1 mês de imersão, onde se observa redução visível no diâmetro da amostra.

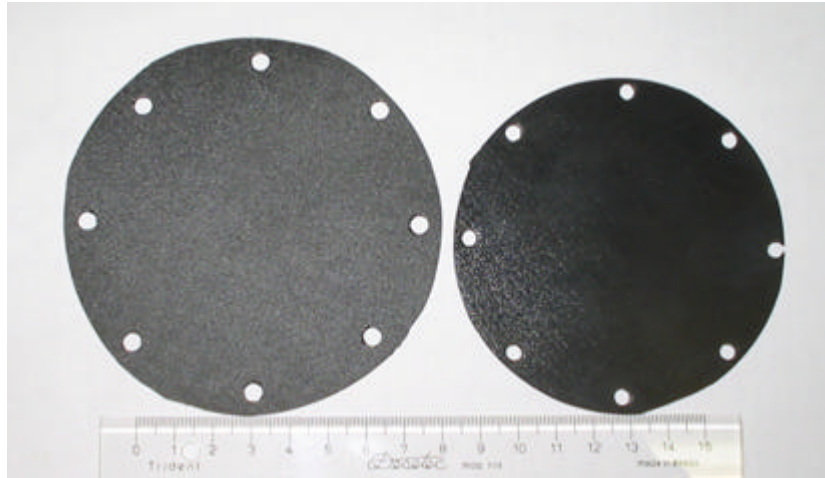


Figura 5.1-Geomembrana virgem e geomembrana após 1 mês de imersão em gasolina comum.

A Figura 5.2 apresenta o resultado da razão entre a massa em cada mês e a massa inicial versus tempo de imersão para as geomembranas (GM/A), quando submetidas à imersão em gasolina comum por um período de até 12 meses. Percebe-se que nos primeiros 4 meses, as amostras perderam maiores quantidades de massa e após esse tempo as perdas de massa foram diminuindo. É importante considerar que com o passar do tempo as amostras foram recuperando parte da massa perdida nos primeiros meses de imersão.

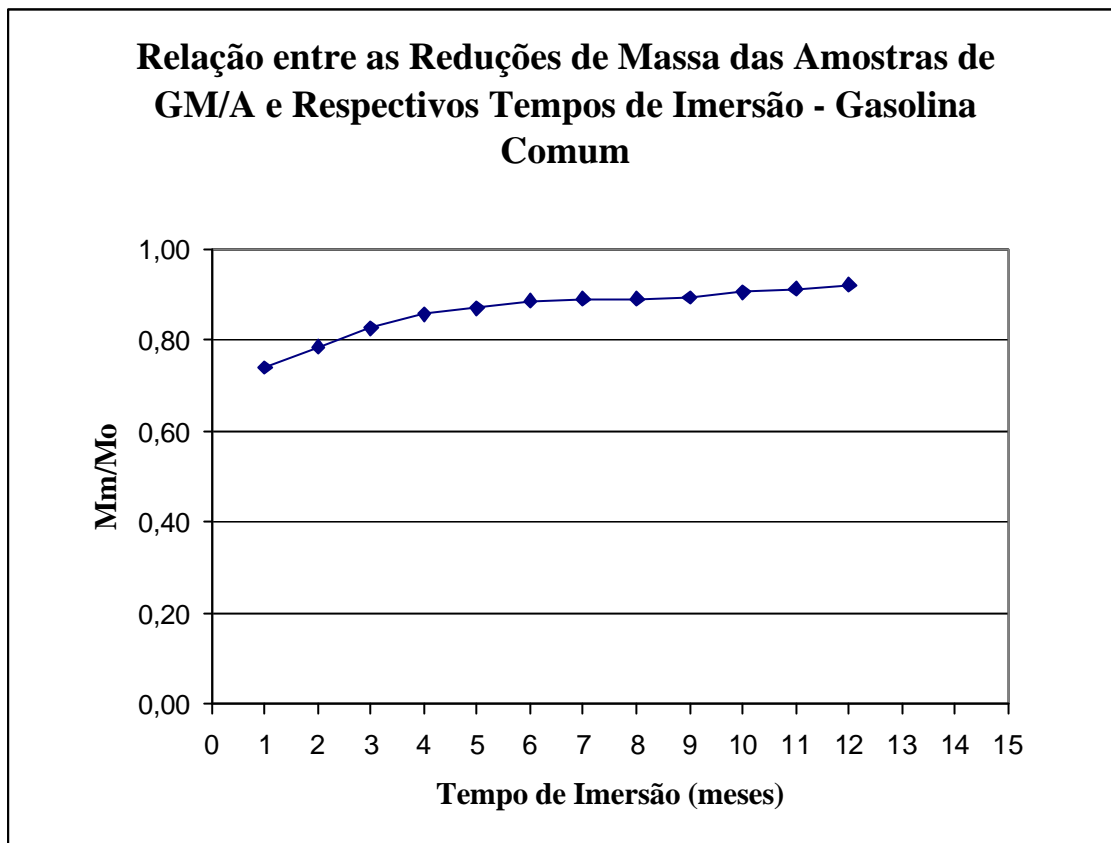


Figura 5.2 - Relação Mm/Mo das Amostras de GM/A em Gasolina Comum Versus Tempo de imersão.

A Figura 5.3 apresenta o resultado da razão entre o diâmetro medido em cada mês e o diâmetro inicial das amostras de GM/A versus tempo, após imersão em gasolina comum, no período de 1 até 12 meses. Nota-se que nos primeiros 4 meses também ocorreram maiores variações de diâmetro e após esse tempo o diâmetro tendeu a se aproximar do diâmetro inicial das amostras.

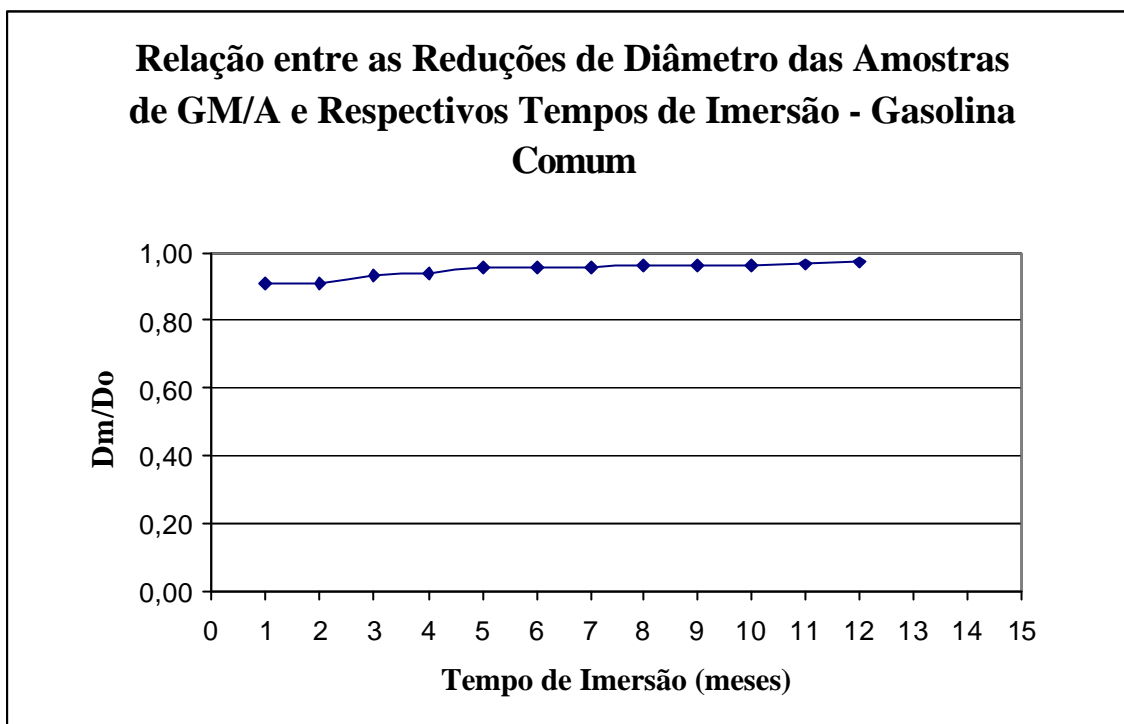


Figura 5.3 - Relação do D_m/D_o das amostras de GM/A em gasolina comum versus Tempo de Imersão.

5.1.2) Resultados para Geomembranas GM/B (PVC – 2,0mm)

Observa-se na Tabela 5.2 que também ocorreu uma diminuição de massa e diâmetro das amostras de geomembranas GM/B após imersão em gasolina comum, assim como observado para as amostras de GM/A. As amostras GM/B também apresentaram enrijecimento após o primeiro mês de imersão.

Nota-se que as reduções de massa variaram de 24,3 até 4,8%, e as reduções de diâmetro de 5,6 até 1,8%.

Tabela 5.2- Resultados de Massas e Diâmetros das Geomembranas GM/B Imersas em Gasolina Comum.

Tempo de imersão (mês)	M_m (g)	M_m/M_o	Redução de massa (%)	D_m (cm)	D_m/D_o	Redução de diâmetro (%)
1	15,75	0,76	24,31	9,44	0,94	5,60
2	16,60	0,80	20,23	9,30	0,93	7,00
3	16,79	0,81	19,32	9,27	0,93	7,30
4	17,44	0,84	16,19	9,40	0,94	6,00
5	18,07	0,87	13,17	9,54	0,95	4,60
6	18,30	0,88	12,06	9,61	0,96	3,90
7	18,57	0,89	10,76	9,67	0,97	3,30
8	18,67	0,90	10,28	9,73	0,97	2,70
9	18,77	0,90	9,80	9,73	0,97	2,70
10	18,85	0,91	9,41	9,75	0,98	2,50
11	18,97	0,91	8,84	9,79	0,98	2,10
12	19,31	0,93	4,80	9,82	0,98	1,80

Nota: Peso Inicial das Amostras (M_o) = 20,82g; Diâmetro Inicial das Amostras (D_o) = 10cm.

M_m = Massa das Amostras Medido no Mês; D_m = Diâmetro das Amostras Medido no Mês.

A Figura 5.4 apresenta o comportamento das amostras de GM/B, após imersão em gasolina, no período de 1 até 12 meses. Observa-se que a curva é semelhante àquela obtida na Figura 5.2, para as amostras GM/A. Este resultado foi satisfatório, pois teoricamente a diferença nestes dois tipos de geomembranas está apenas na espessura, uma vez que a composição química das membranas, segundo fornecedores, é a mesma.

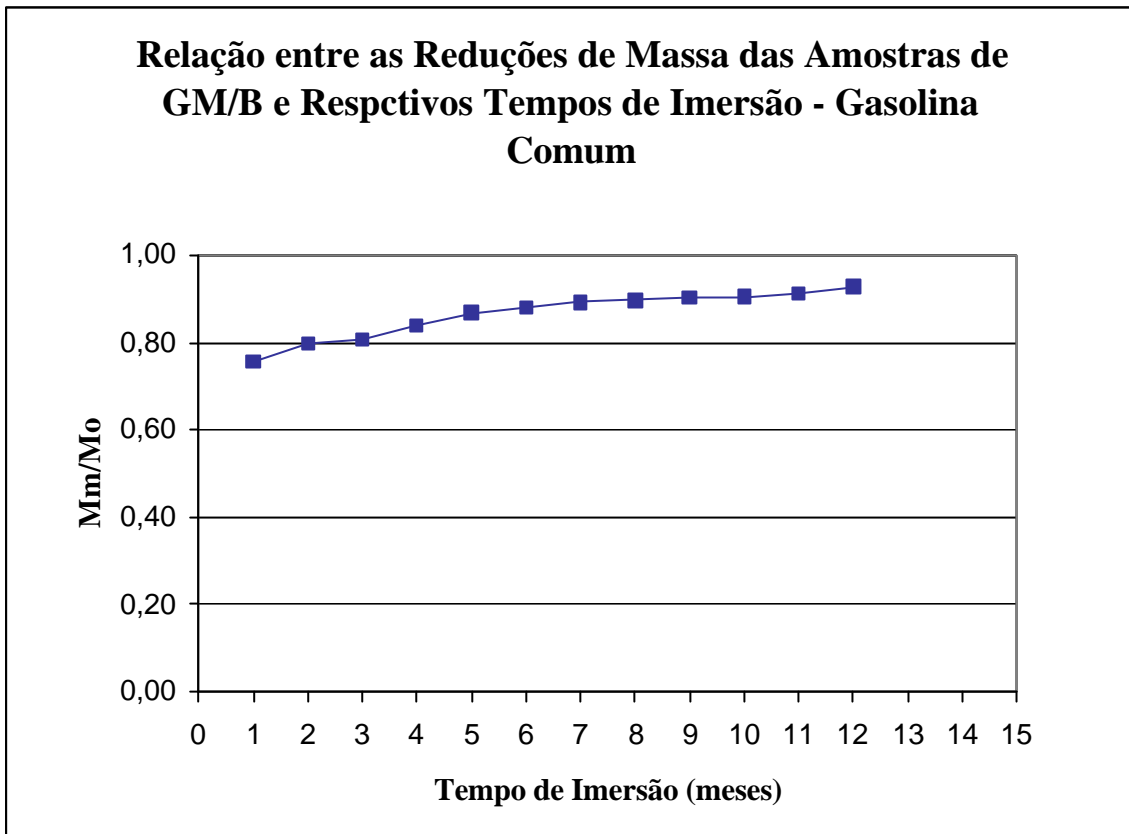


Figura 5.4 - Relação M_m/M_o das Amostras de GM/B em Gasolina Comum Versus Tempo de Imersão.

A Figura 5.5 apresenta a curva da razão entre o diâmetro medido a cada mês e o diâmetro inicial das geomembranas GM/B após imersão em gasolina por um período de 1 até 12 meses. Observa-se que as amostras de GM/B no primeiro mês de imersão reduziram 5,6% de diâmetro enquanto as amostras de GM/A reduziram 9,0% (Tabela 5.2), apesar de serem constituídas de um mesmo polímero (PVC). Estas diferenças podem estar associadas às diferentes espessuras das geomembranas ou a variações de composição.

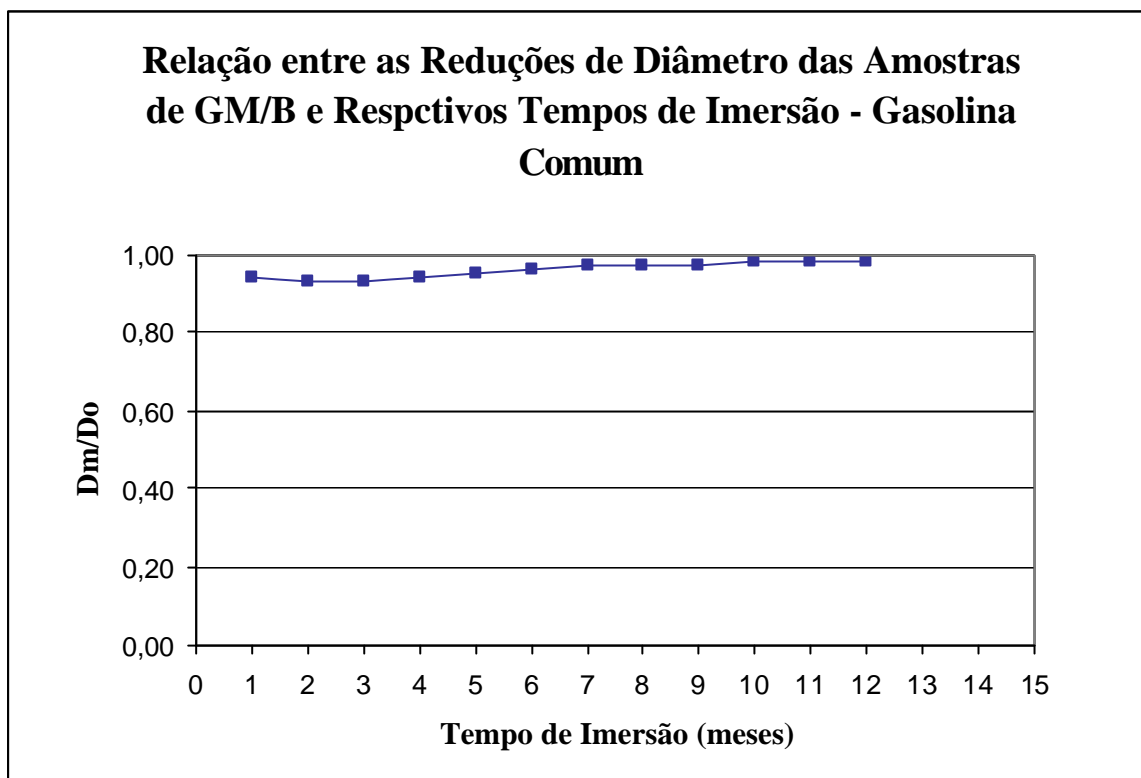


Figura 5.5 - Relação D_m/D_o das Amostras de GM/B em Gasolina Comum Versus Tempo de Imersão.

A Tabela 5.3 proporciona a comparação entre os resultados das reduções de massa nas amostras de GM/A e GM/B para o tempo de imersão em gasolina de 12 meses. Observa-se que as reduções de massa foram mais significativas do que as de diâmetro. Pode-se constatar que essa diferença realmente está associada à espessura das amostras. As geomembranas com espessura de 1,0mm apresentaram maior facilidade de perda de massa que as amostras com 2,0mm de espessura, por possuírem uma seção transversal menor a ser percorrida pelo fluido no processo de degradação.

Tabela 5.3-Comparação entre as reduções de massas e diâmetros medidos para as amostras de GM/A e GM/B após imersão em gasolina comum, pelo período de até 12 meses.

Geomembrana	Porcentagem de redução do peso (%)	Porcentagem de redução do diâmetro (%)
GM/A	7,94	2,90
GM/B	4,80	1,80

5.2-RESULTADOS DAS REDUÇÕES DE MASSA E DIÂMETRO DAS AMOSTRAS APÓS IMERSÃO NO FLUIDO SC50

5.2.1-Resultados para Geomembranas GM/A (PVC – 1,0mm)

Observa-se na Tabela 5.4 que ocorreu redução de massa e diâmetro nas amostras ensaiadas, assim como foi observado nos resultados obtidos quando o fluido agressivo foi a gasolina comum (GSC). Entretanto, o comportamento das amostras foi diferente. As perdas de peso foram aumentando gradativamente com o tempo. Cabe salientar que também observou-se o enrijecimento das amostras, como ocorreu nos resultados em que o fluido agressivo foi a gasolina comum (GSC).

Tabela 5.4-Resultados de Massas e Diâmetros das Geomembranas GM/A Imersas no Fluido SC50.

Tempo de imersão (mês)	M_m (g)	M_m/M_o	Redução do Massa (%)	D_m (cm)	D_m/D_o	Redução do diâmetro (%)
1	9,27	0,97	3,04	9,95	1,00	0,50
2	9,30	0,97	2,72	9,98	1,00	0,20
3	9,12	0,95	4,60	9,85	0,99	1,50
4	9,42	0,99	1,46	9,15	0,92	8,50
5	9,28	0,97	2,92	9,17	0,92	8,13
6	7,54	0,79	21,12	9,18	0,92	8,20
7	7,56	0,79	20,92	9,19	0,92	8,10
8	7,57	0,79	20,82	9,20	0,92	8,00
9	7,37	0,77	22,91	9,16	0,92	8,40
10	7,42	0,78	22,38	9,22	0,92	7,80
11	7,46	0,78	21,97	9,17	0,92	8,30
12	7,42	0,78	22,38	9,12	0,92	8,80

Nota: Massa Inicial das Amostras (M_o) = 9,56g; Diâmetro Inicial das Amostras(D_o) = 10cm.

M_m = Massa das Amostras Medida no Mês; D_m = Diâmetro das Amostras Medido no Mês.

Observa-se nas Figuras 5.6 e 5.7 que as perdas iniciais e finais de peso e diâmetro nas amostras de GM/A, são completamente diferentes daqueles obtidos para as geomembranas que foram imersas em gasolina comum. Inicialmente, para os resultados com o fluido SC50, nos 5 primeiros meses ocorreram pequenas perdas de massa, inferiores a 5%, em seguida esses valores aumentaram para 21%. Quanto aos diâmetros, nos três primeiros meses as reduções não foram significativas, no quarto mês ocorreu um pico de redução de diâmetro de aproximadamente 8,5% e em seguida esse valor diminuiu e estabilizou em torno dos 8%.

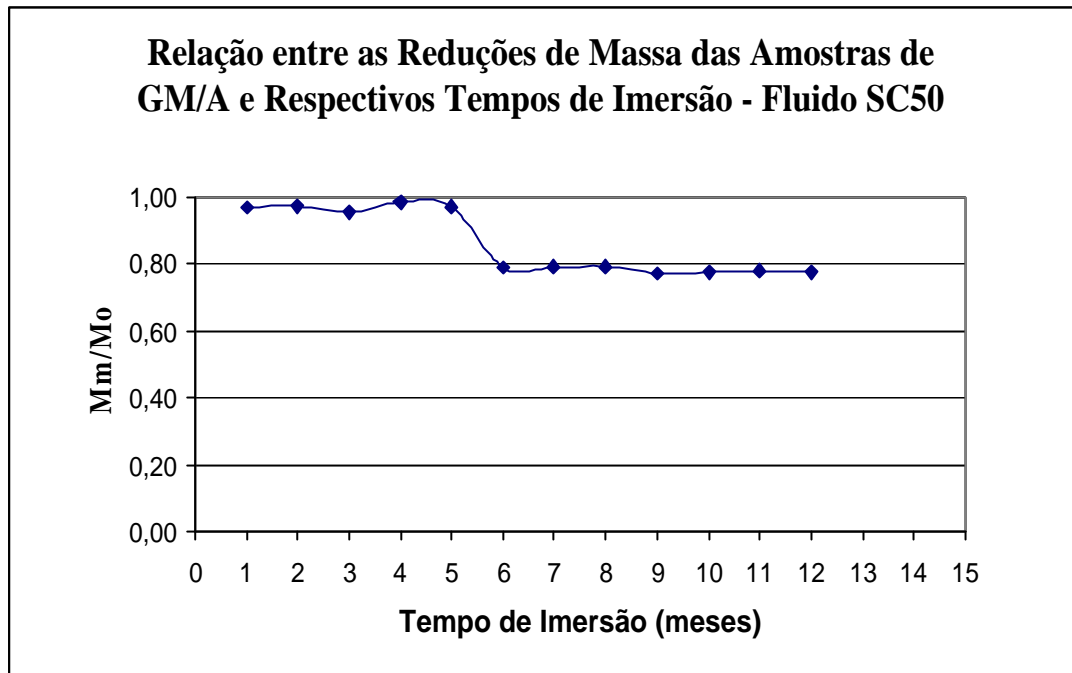


Figura 5.6 - Relação de M_m/M_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/A no fluido SC50.

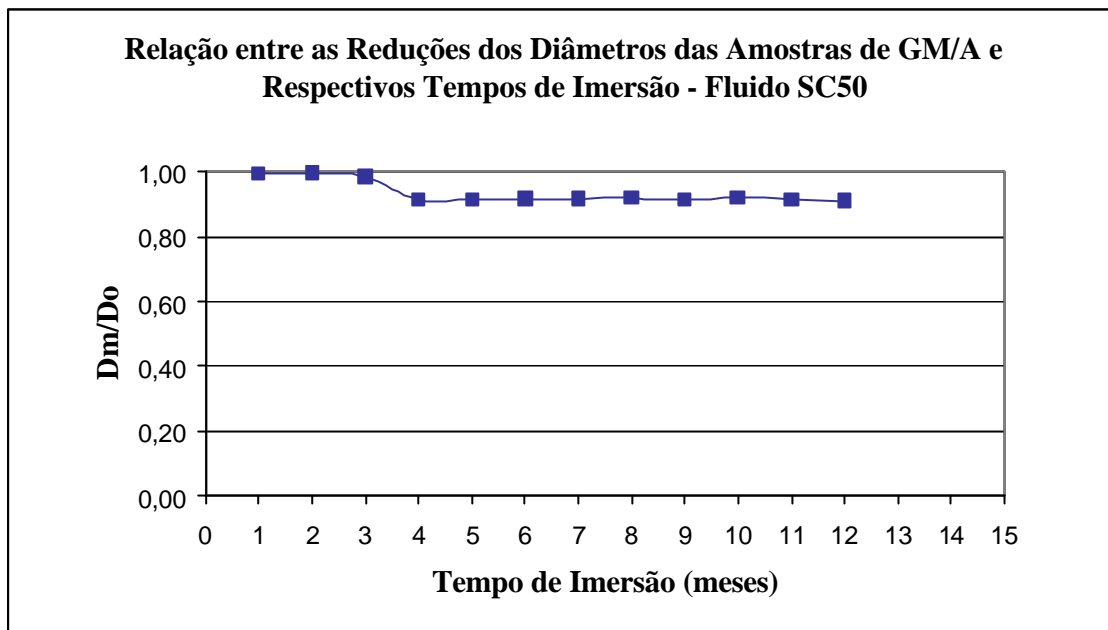


Figura 5.7 - Relação D_m/D_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/A no fluido SC50.

5.2.2-Resultados para Geomembranas GM/B

Observa-se na Tabela 5.5 que também ocorreram reduções de massa e diâmetro nas amostras de GM/B estudadas. As reduções de massa variaram entre 1,97% e 15,72% e de diâmetro, entre 0% e 4,1%. As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os resultados obtidos ao longo do tempo.

Tabela 5.5-Resultados de massas e diâmetros das geomembranas GM/B imersas no fluido SC50.

Tempo de imersão (mês)	M_m (g)	M_m/M_o	Redução do Massa (%)	D_m (cm)	D_m/D_o	Redução do diâmetro (%)
1	20,40	0,98	1,97	10	1,00	0
2	20,10	0,97	3,41	9,99	1,00	0,10
3	20,00	0,96	3,89	10	1,00	0
4	19,27	0,93	7,40	9,83	0,98	1,70
5	18,65	0,90	10,38	9,78	0,98	2,20
6	17,94	0,86	13,79	9,67	0,97	3,30
7	17,98	0,86	13,60	9,65	0,97	3,50
8	18,00	0,86	13,50	9,60	0,96	4,00
9	17,81	0,86	14,40	9,61	0,96	3,90
10	17,65	0,85	15,18	9,62	0,96	3,80
11	17,54	0,84	15,72	9,59	0,96	4,10
12	17,56	0,84	15,62	9,64	0,96	3,60

Nota: Massa Inicial das Amostras (M_o) = 20,82g; Diâmetro Inicial das Amostras (D_o) = 10cm.

P_m = Massa das Amostras Medida no Mês; D_m = Diâmetro das Amostras Medido no Mês.

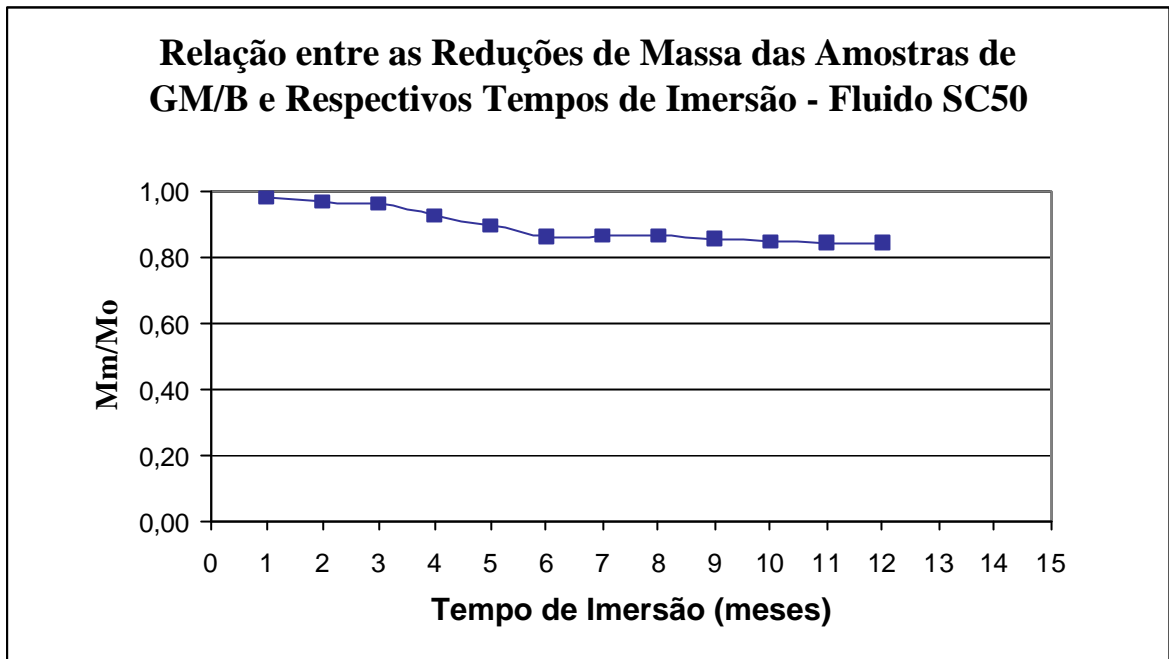


Figura 5.8 - Relação M_m/M_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/B no fluido SC50.

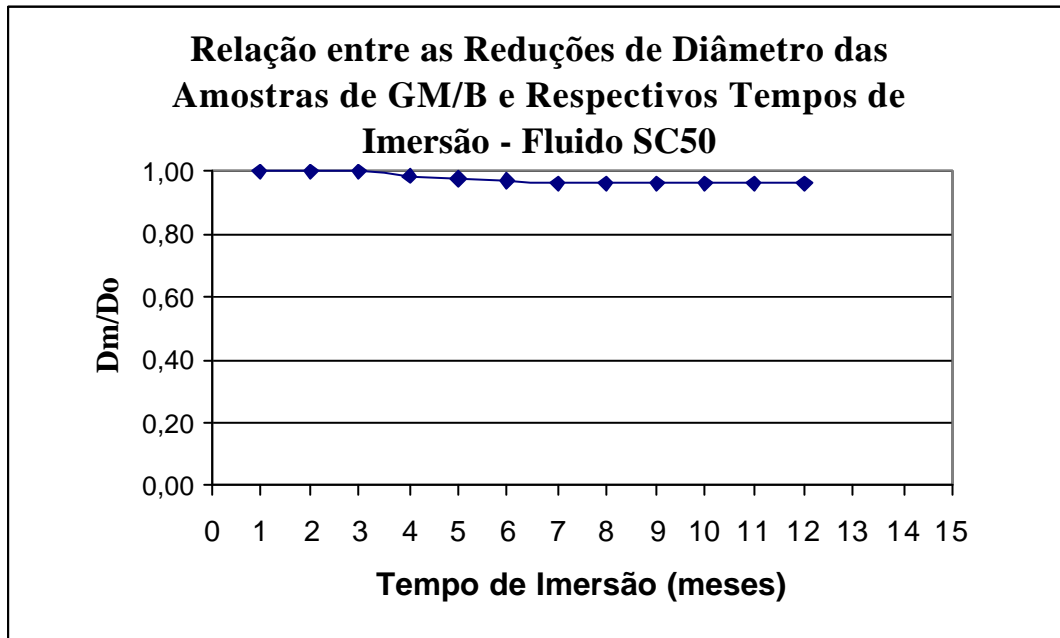


Figura 5.9 - Relação de D_m/D_o Versus Tempo de Imersão das Amostras de GM/B no fluido SC50.

Observa-se na Tabela 5.6 os resultados das reduções de porcentagens de massa e diâmetro das amostras de GM/A e GM/B, após 12 meses de imersão no fluido SC50. Nota-se que as reduções mais significativas são as de massa, principalmente para as geomembranas GM/A.

Tabela 5.6-Comparação das reduções de massa e diâmetros medidos para as amostras de GM/A e GM/B após Imersão de 12 meses no Fluido SC50.

Geomembrana	Porcentagem de redução de massa (%)	Porcentagem de redução do diâmetro (%)
GM/A	22,38	8,80
GM/B	15,62	3,60

Não foram realizados ensaios de variação de massa versus tempo para outros intervalos de tempo e concentrações de soda cáustica, devido às leituras terem sido praticamente constantes após os 6 meses de imersão e também devido a algumas dificuldades encontradas para o armazenamento de maior quantidade de amostras. Foram realizados outros tipos de ensaios com fluidos diferentes e tempos variados de imersão, os quais serão apresentados ainda neste capítulo.

5.3) RESULTADOS DE PERDA DE MASSA COM O ACRÉSCIMO DE TEMPERATURA (TG)

5.3.1) Resultados dos Ensaio de TG para Geomembranas GM/A (PVC = 1,0mm) após Variados Tempos de Imersão em Fluidos Agressivos

a) Fluido: Gasolina Comum (GSC)

A Figura 5.10 apresenta as variações de temperatura de decomposição para amostras de geomembranas de PVC com espessura = 1,0mm versus tempo. Para cada tempo de imersão (de 1 até 24 meses) as amostras apresentaram temperaturas de decomposição variadas. Observa-se para o tempo 0 (amostra virgem) que a primeira temperatura apresentada está em torno de 220°C e a

última está em torno de 480°C. Para os tempos de 6 e 9 meses, percebe-se que as temperaturas de decomposição das amostras foram bastante semelhantes. A partir do 12º mês, as variações das temperaturas de decomposição são mais diferenciadas. No 15º mês as amostras somente apresentaram 03 temperaturas de decomposição, esse fenômeno ocorre também para os tempos de 21 até 24 meses. Estes ensaios não foram realizados para o tempo de 3 meses de imersão. Observando todos os resultados apresentados, pode-se afirmar que as amostras, após imersão em GSC, apresentaram realmente alterações.

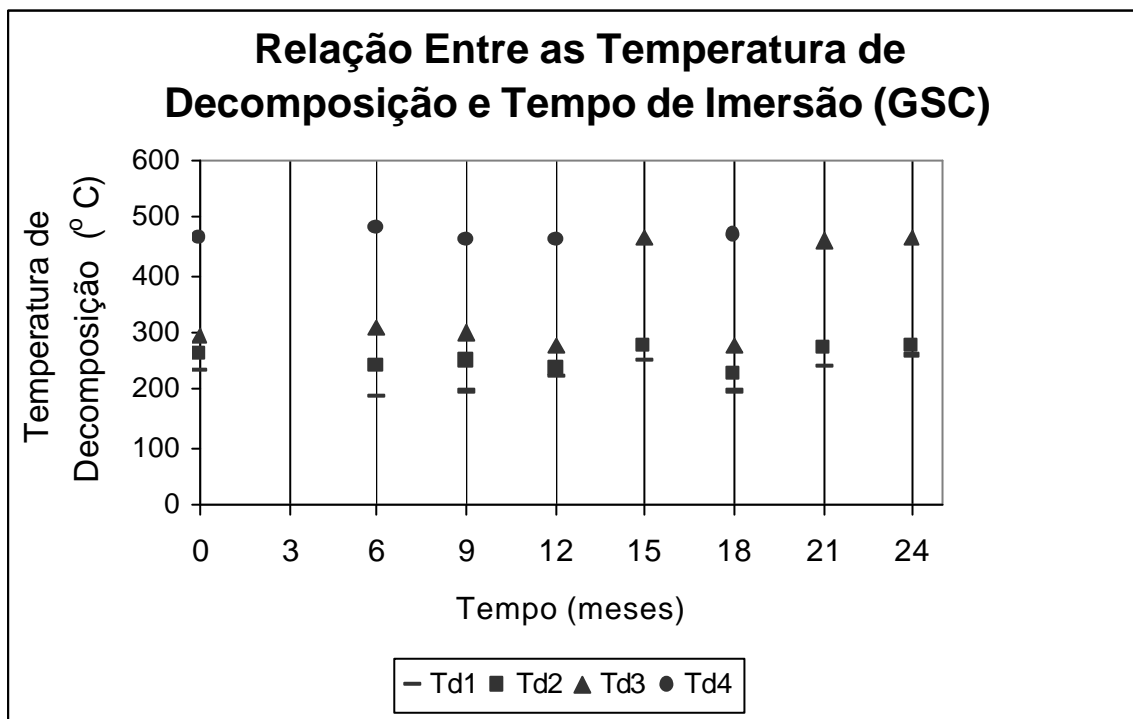


Figura 5.10 – Representação gráfica da relação entre as variações de temperaturas de decomposição de geomembranas de PVC (e=1,0mm) e variados tempos de imersão em GSC.

A Figura 5.11 apresenta as variações de perda de massa observadas no ensaio de TG para amostras virgens e amostras que foram submetidas à imersão no fluido GSC pelos tempos de 6 até 24 meses. Nota-se na figura que até 100°C as amostras não apresentam perdas de massa significativas; essas perdas não chegaram a 1%. No entanto, para as temperaturas maiores que

100°C são iniciadas perdas de massa mais significativas. As amostras que permaneceram imersas entre 6 e 18 meses apresentaram menores perdas de massa para as mesmas temperaturas que as amostras virgens. Para os tempos de 12 até 21 meses as variações de perdas de massa também foram inferiores às apresentadas para amostras virgens, porém foram um pouco maiores que os resultados observados para amostras que ficaram imersas pelos tempos de 6 e 9 meses. Esses resultados mostram que amostras de geomembranas após contato com gasolina comum, por variados tempos apresentam alterações em suas estruturas. Essas alterações reduzem a massa residual das amostras e conseqüentemente as tornam mais frágeis e quebradiças.

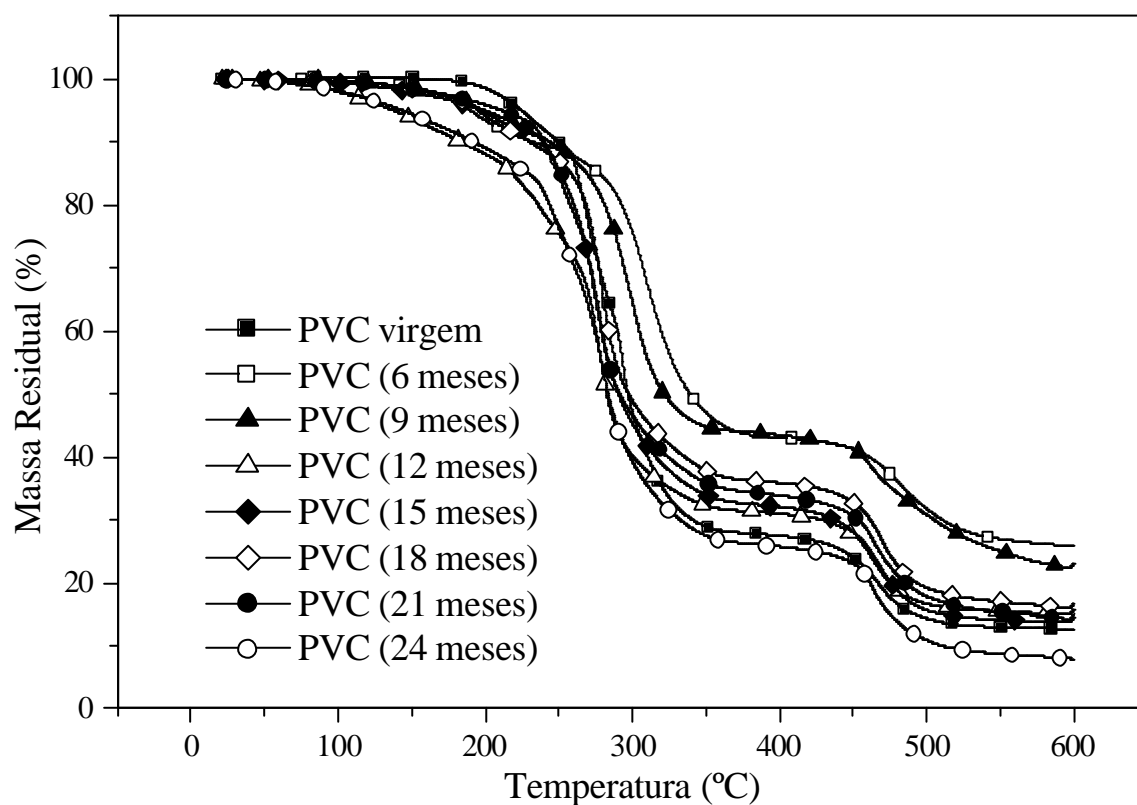


Figura 5.11 – Curvas TG de amostras de GM/A ($e = 1,0\text{mm}$) após imersão em GSC.

A Figura 5.12 apresenta-se a derivada da curva apresentada na Figura 5.11. Observam-se claramente picos que são os pontos de maiores perdas de massa das amostras. Percebe-se que as

maiores perdas de massa estão entre 250 e 300 °C. Essa informação é complementar para a confirmação das análises.

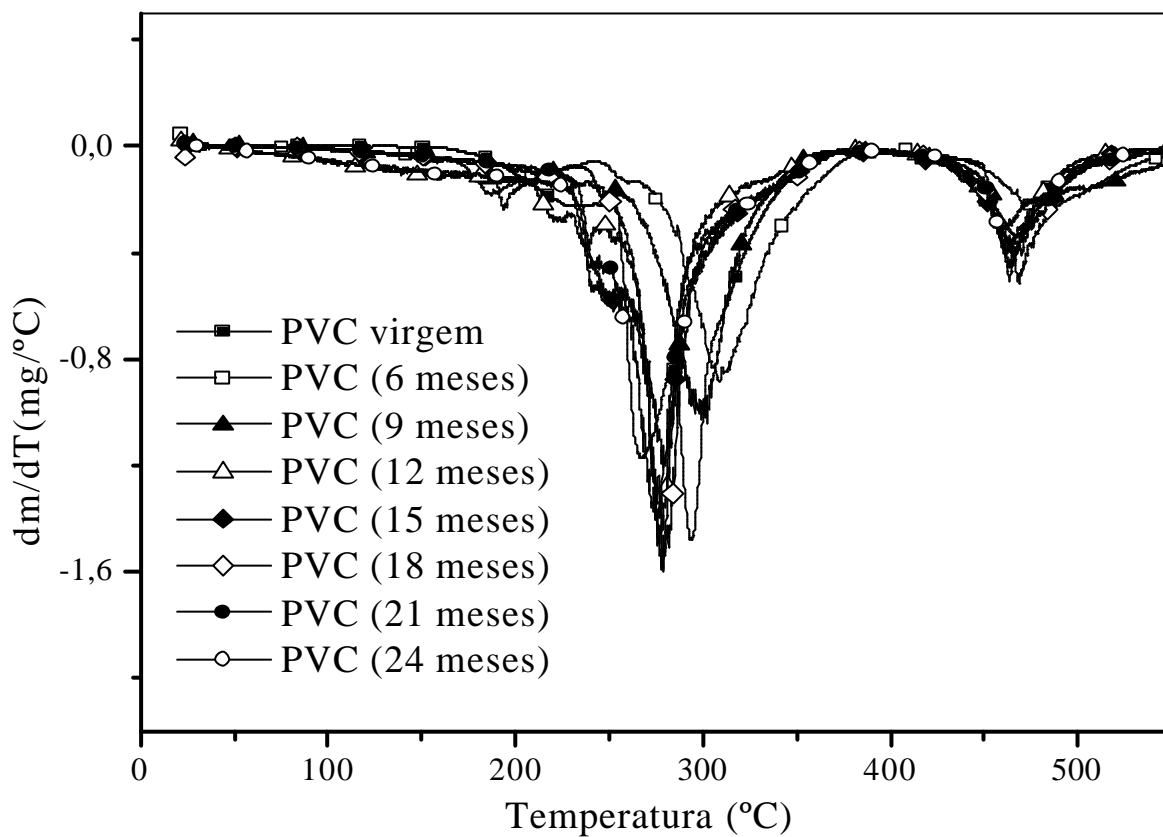


Figura 5.12 - Curvas DTG para amostras de geomembranas de PVC (e = 1mm) virgem e após imersão em gasolina comum.

A Tabela 5.7 apresenta as temperaturas de decomposição e as perdas de massa observadas no ensaio de TG para amostras virgens e amostras degradadas quimicamente.

Tabela 5.7 - Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras GM/A imersas no fluido GSC.

Amostra	T_{d1} (°C)	T_{d2} (°C)	T_{d3} (°C)	T_{d4} (°C)	Perda de massa (%)
Virgem	233	265	294	466	89
6 meses	186	242	309	482	74
9 meses	195	250	298	461	78
12 meses	222	237	278	463	85
15 meses	252	277	467	-	86
18 meses	195	228	279	469	84
21 meses	242	275	463	-	85
24 meses	258	279	464	-	92

b) Fluido: Soda cáustica diluída em água numa proporção de 50% (SC50)

A Figura 5.13 apresenta os resultados do ensaio de TG para amostras de geomembranas de PVC com espessura = 1,0mm. O comportamento das amostras degradadas é diferenciado do comportamento das amostras virgens principalmente pela quantidade de temperaturas de decomposição que as amostras apresentaram. Para amostras virgens observam-se quatro temperaturas de decomposição. A temperatura em torno de 300°C não aparece para amostras que permaneceram em imersão na soda cáustica diluída. Esse fenômeno confirma que ocorreram transformações internas nas propriedades das geomembranas, quando essas amostras são submetidas ao contato por determinados tempos com SC50. Não foram realizadas leituras para o tempo de 3 meses de imersão. Optou-se pela primeira leitura a partir do 6º mês.

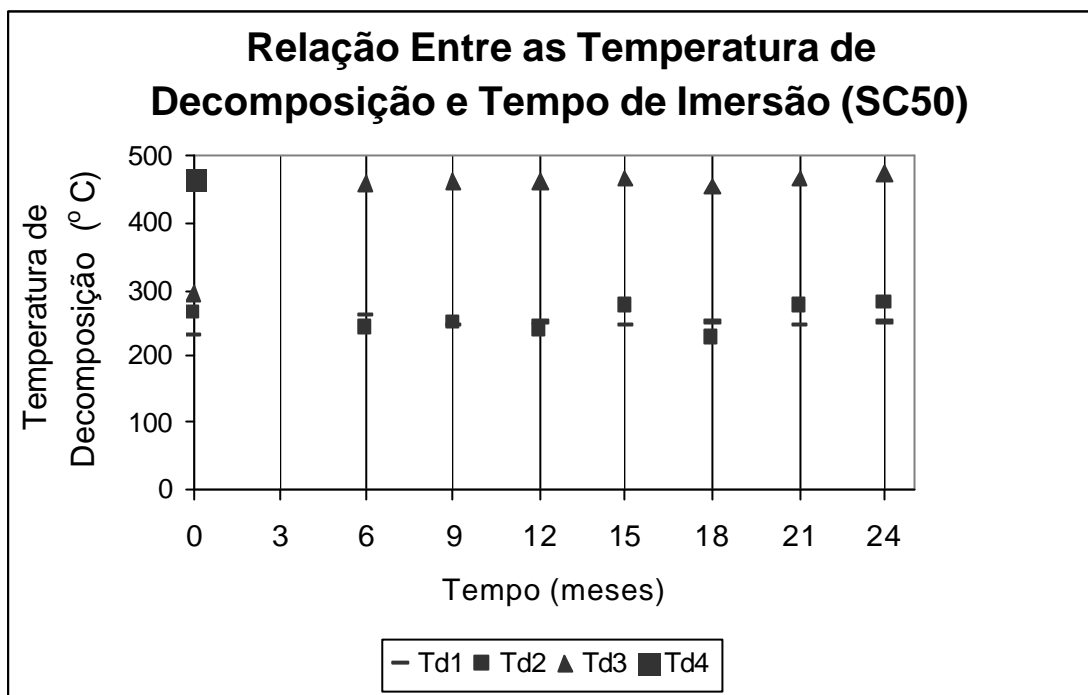


Figura 5.13 – Representação gráfica da relação entre as variações de temperaturas de decomposição de geomembranas de PVC (e = 1,0mm) e variados tempos de imersão em SC50.

A Figura 5.14 apresenta os resultados de perda de massa com a temperatura nos ensaios de TG para amostras de geomembranas de PVC (e=1,0mm), virgens e após imersão em soda cáustica diluída em água numa proporção de 50%. Percebe-se que até 200°C as amostras virgens e após imersão, perdem menos de 5% de massa residual. Isso significa que as geomembranas resistiram a temperaturas de até 200°C sem apresentarem variações nas suas propriedades. No entanto, esta afirmação não pode ser conclusiva, pois se faz necessário analisar os resultados dos ensaios de tração simples para estas mesmas amostras.

Comparando as Figuras 5.11 e 5.14, percebe-se que as geomembranas após a imersão no fluido GSC apresentam maiores perdas de massa até 200°C do que as amostras que permaneceram imersas em SC50.

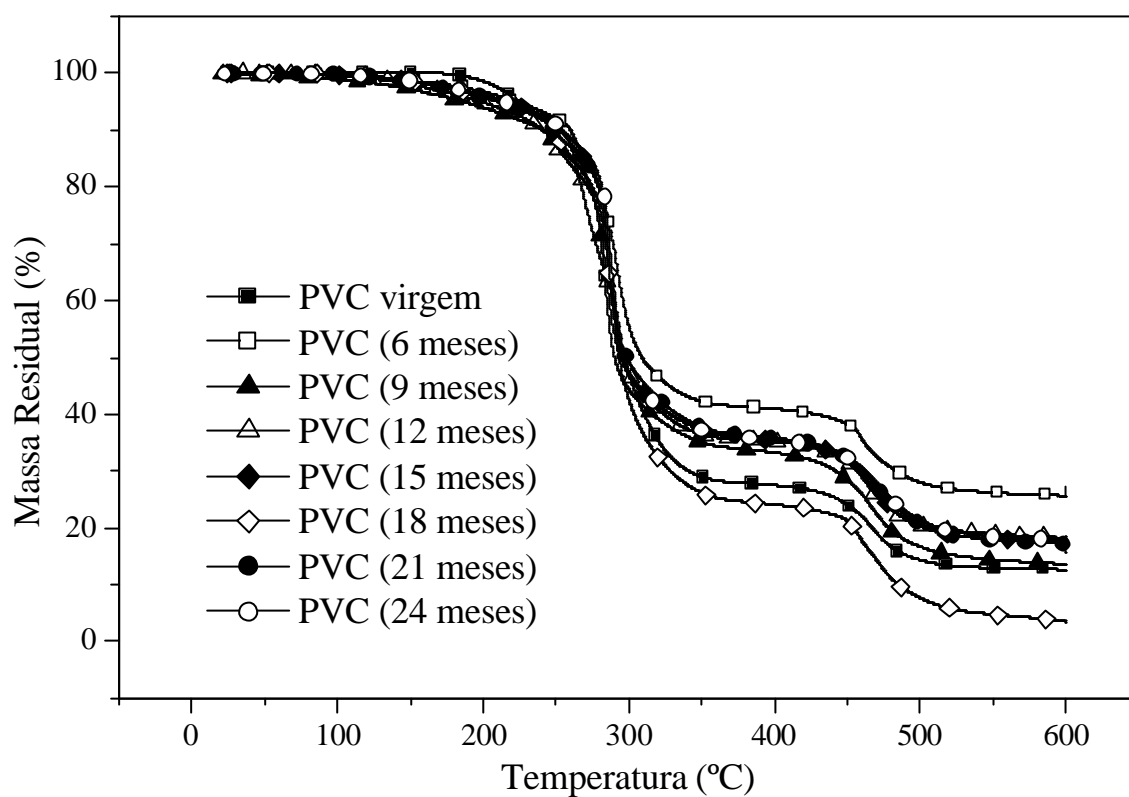


Figura 5.14 – Curvas TG em amostras de GM/A ($e = 1,0\text{mm}$) virgem e após imersão em SC50.

A Figura 5.15 apresenta as derivadas das curvas resultantes do ensaio de Termogravimetria (Figura 5.14). Os pontos de maiores perdas de massa nas amostras são aqueles que estão entre 280 e 300 °C.

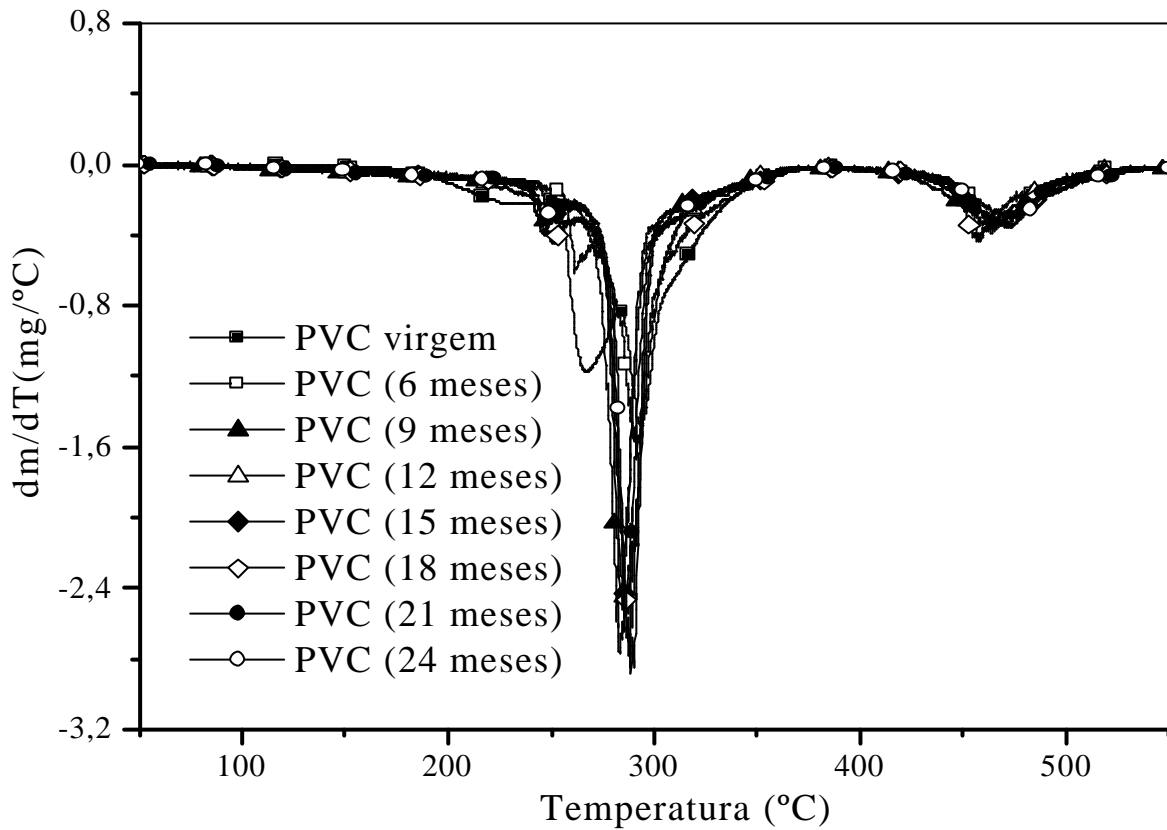


Figura 5.15 - Curvas DTG para amostras de GM/A ($e = 1,0\text{mm}$) virgem e após imersão em SC50.

A Tabela 5.7 apresenta as temperaturas de decomposição e as perdas de massa observadas no ensaio de TG para geomembranas em PVC com espessura de $1,0\text{mm}$ (virgens e degradadas). Percebe-se que somente as amostras virgens apresentaram a quarta temperatura de decomposição. Esse comportamento demonstra que o contato entre as amostras e o fluido SC50 acelerou o processo de degradação.

Tabela 5.7-Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GM/A imersas no fluido SC50.

Amostra	T_{d1} (°C)	T_{d2} (°C)	T_{d3} (°C)	T_{d4} (°C)	Perda de massa (%)
Virgem	233	265	294	466	89
6 meses	263	292	459	-	74
9 meses	246	284	464	-	86
12 meses	249	284	462	-	81
15 meses	248	288	466	-	82
18 meses	251	288	457	-	96
21 meses	247	286	468	-	82
24 meses	250	289	475	-	82

5.3.2) RESULTADOS DOS ENSAIOS TERMOMECÂNICOS (TMA) EM AMOSTRAS DE GM/A VIRGENS E APÓS IMERSÃO NOS FLUIDO GSC E SC50

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam os resultados dos ensaios de TMA realizados em amostras de GM/A após imersão nos fluidos GSC e SC50. As curvas mostram que antes da transição, as amostras não apresentaram expansão. Após a temperatura de transição vítrea, as geomembranas têm expansão entre 120 e 200% e as amostras imersas nos fluidos apresentaram, de forma geral, uma diminuição na expansão, em relação ao PVC virgem. Após a primeira expansão, foram observadas regiões onde o coeficiente de expansão (α) é igual a zero, para todas as amostras, indicando que na sua composição existem, provavelmente, substâncias diferentes do PVC.

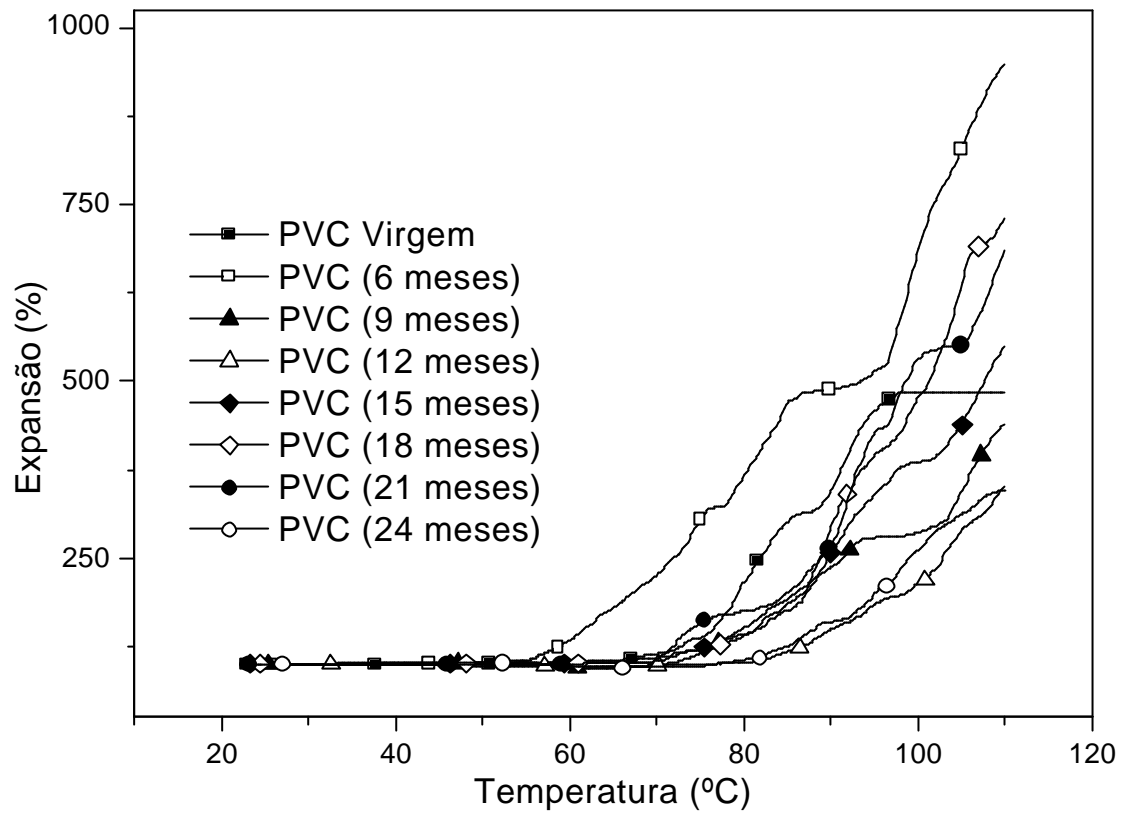


Figura 5.16 - Curvas TMA para as geomembranas de PVC virgem e após imersão no fluido GSC.

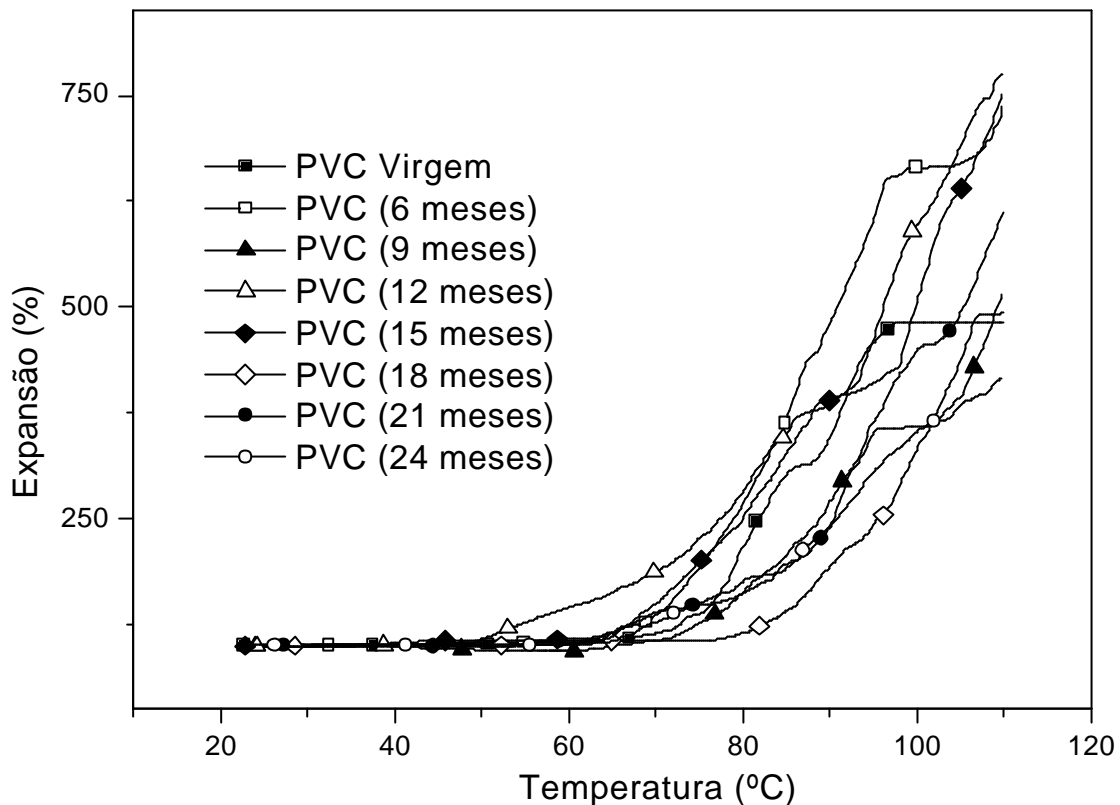


Figura 5.17 - Curvas TMA para as geomembranas de PVC virgem e após imersão no fluido SC50.

5.3.3) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/B APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

A Figura 5.18 apresenta os resultados do ensaio de TG para amostras de geomembranas de PVC ($e=2,0\text{mm}$) virgens e após imersão em soda cáustica diluída em água numa proporção de 50%, por variados intervalos de tempo. As perdas de massa apresentadas pelas amostras virgens foram mais significativas que as perdas apresentadas pelas amostras que permaneceram em imersão. Essa afirmativa é correta somente para temperaturas maiores que 300°C . Conforme as análises apresentadas no início deste capítulo, sabe-se que as amostras submetidas à imersão nos fluidos agressivos por tempos maiores que 3 meses apresentaram-se mais rígidas que as amostras virgens. Cruzando estas informações, pode-se concluir que amostras virgens são mais flexíveis e

mais suscetíveis a perdas de massa com o acréscimo de temperatura e as amostras degradadas são mais rígidas e menos suscetíveis a perdas de massa com o acréscimo de temperatura. Além disso, as amostras mais rígidas tornam-se mais quebradiças proporcionando maior facilidade para o aparecimento de fissuras.

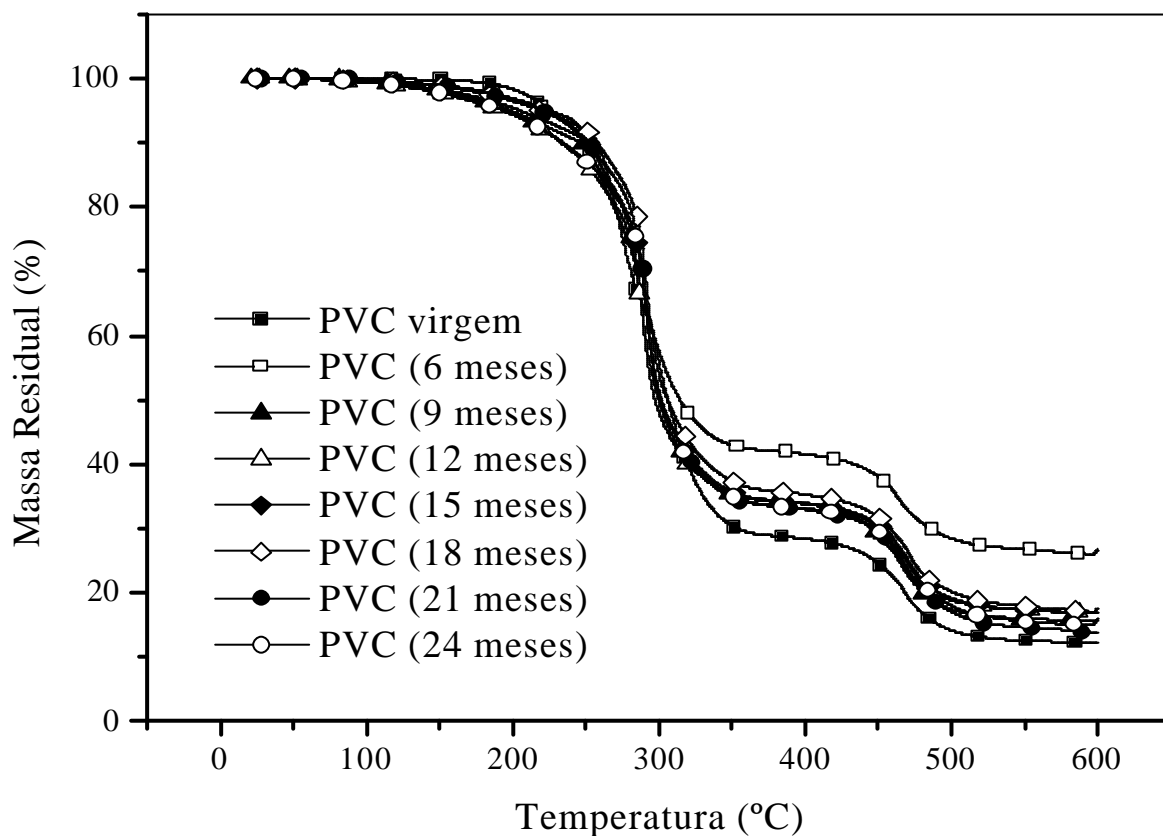


Figura 5.18 – Curvas TG em amostras de GM/B ($e = 2,0\text{mm}$) virgem e após imersão em SC50.

A Figura 5.19 apresenta os picos de maiores perdas de massa das amostras. Percebe-se que os maiores picos estão em torno dos 290°C , após essa temperatura, as perdas são suavizadas, apresentando uma pequena queda em torno dos 450°C .

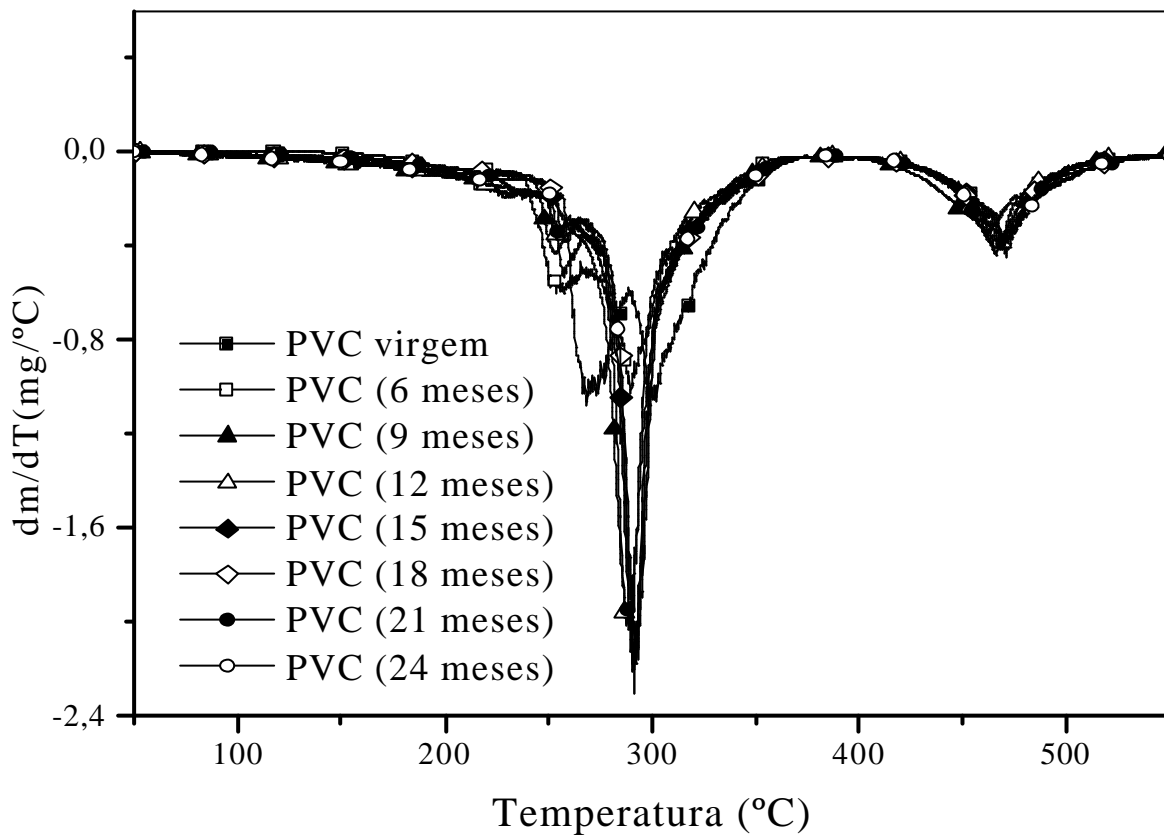


Figura 5.19 – Curvas DTG para amostras de GM/B ($e = 2,0\text{mm}$) virgem e após imersão em SC50.

A Figura 5.20 apresenta o resultado do ensaio de TG para amostras de geomembranas GM/B ($e=2,0\text{mm}$) virgens e amostras que foram submetidas à imersão no fluido GSC. Para todas as amostras, as primeiras perdas de massa mais significativas ocorreram a partir de 100°C . As perdas de massa das amostras degradadas para os tempos de 6 e 9 meses foram aproximadamente 30% menores que as amostras submetidas aos tempos de 12 até 24 meses, inclusive a amostra virgem. Ou seja, aparentemente as reações químicas que ocorrem nos primeiros intervalos de tempo de imersão tornam as amostras degradadas mais resistentes a acréscimos de temperatura. No entanto, essa afirmativa serve apenas para situações de ensaios semelhantes a esses.

A Tabela 5.8 apresenta as temperaturas de decomposição e as perdas de massa das amostras de geomembranas GM/B (e = 2,0mm) observadas no ensaio de TG. Observa-se que somente a amostra virgem apresentou a quarta temperatura de decomposição.

Tabela 5.8- Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de PVC (2mm) imersas no fluido SC50.

Amostra	T_{d1} (°C)	T_{d2} (°C)	T_{d3} (°C)	T_{d4} (°C)	Perda de massa (%)
Virgem	235	271	300	469	88
6 meses	256	290	462	-	74
9 meses	255	289	466	-	83
12 meses	246	284	464	-	84
15 meses	258	291	470	-	83
18 meses	258	293	471	-	83
21 meses	254	291	467	-	86
24 meses	259	292	471	-	85

Após a realização de ensaios com amostras de geomembranas de PVC com 1,0 e 2,0mm de espessura percebeu-se que as espessuras das amostras não influenciaram significativamente nos resultados dos ensaios de TG.

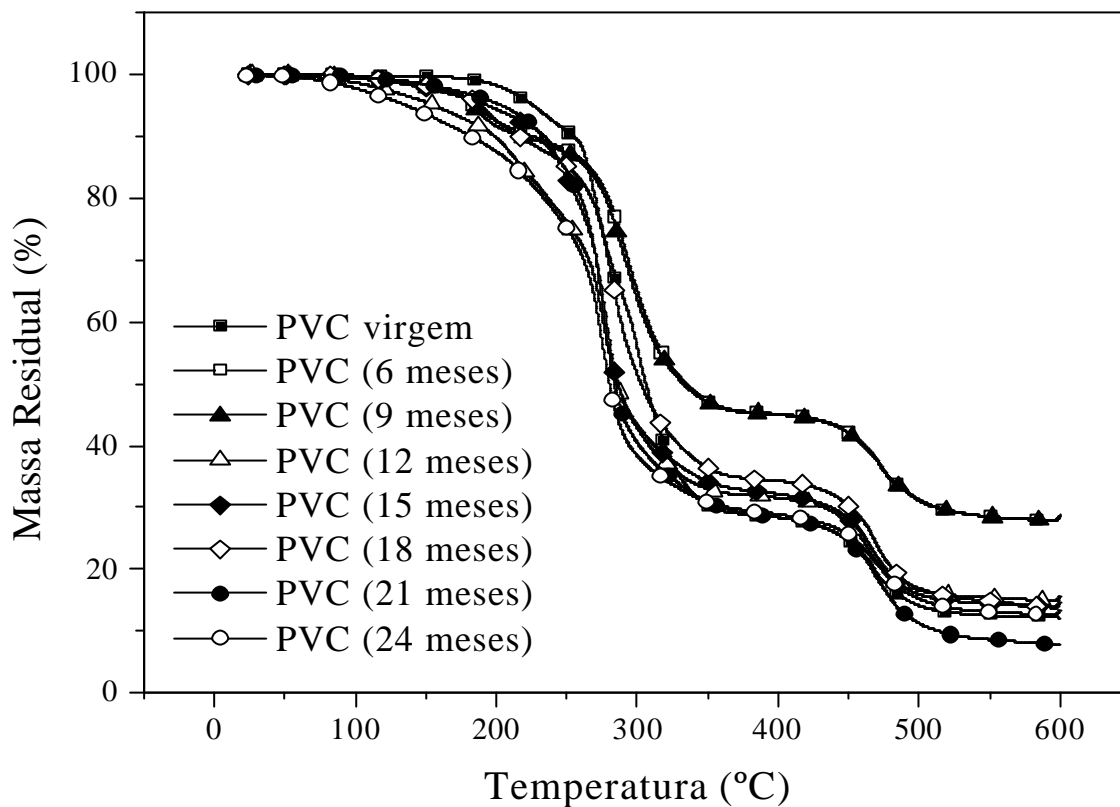


Figura 5.20- Curvas TG em amostras de GM/B ($e = 2,0\text{mm}$) virgem e após imersão em GSC.

A Figura 5.21 apresenta a derivada da curva do ensaio de Termogravimetria (DTG) para as amostras de GM/B. Os pontos de maiores perdas de massa das amostras variaram entre 250 e 300°C.

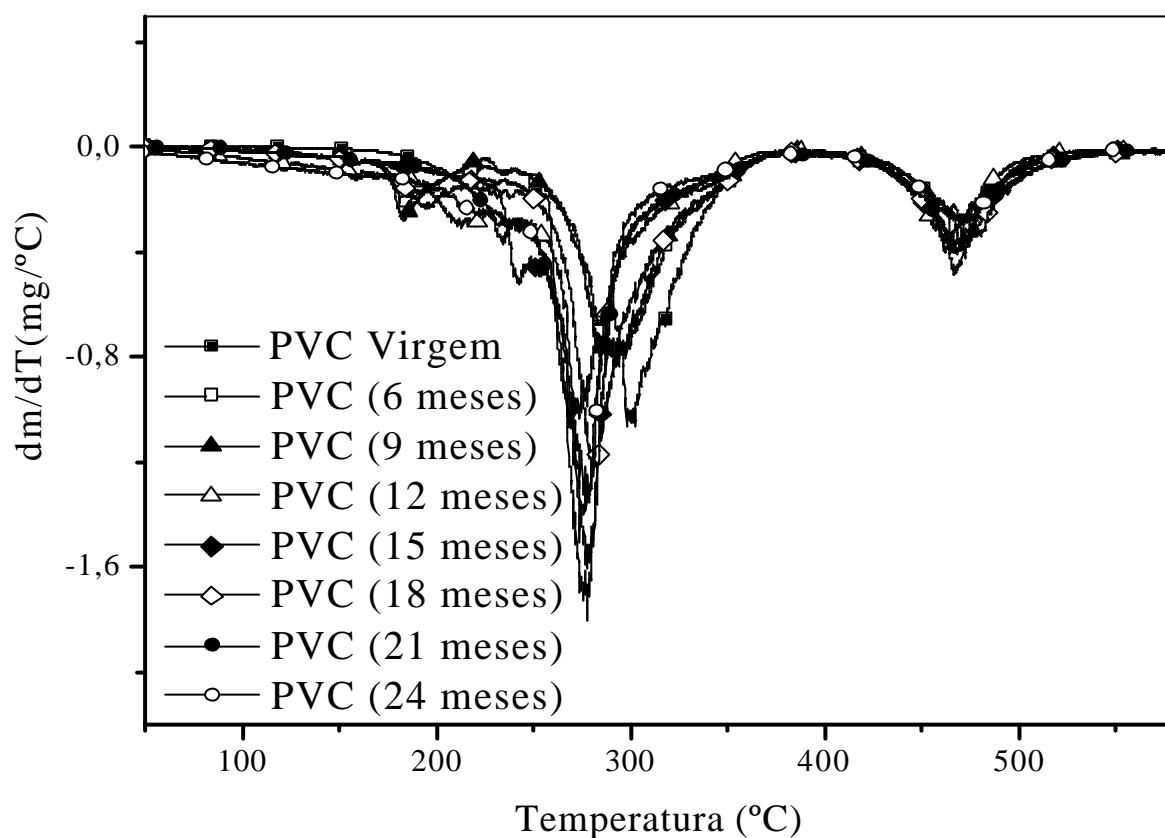


Figura 5.21 - Curvas DTG para geomembranas GM/B virgem e após imersão no fluido GSC.

5.3.4) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/C APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

Inicialmente, esta pesquisa também tinha o objetivo de avaliar o comportamento de geomembranas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) para intervalos de tempos de até 24 meses de imersão nos fluidos agressivos, como realizado para as geomembranas de Poli (cloreto de vinila) - PVC, porém existiram algumas dificuldades para que este objetivo não fosse atingido. Por isso, apresenta-se nesta parte do estudo somente resultados para geomembranas PEAD virgem, e após as imersões de 3, 6 e 9 meses em gasolina comum.

A Figura 5.22 apresenta os resultados do ensaio de TG para geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), virgens e para amostras que foram submetidas à imersão no fluido GSC para os intervalos de tempos de 3 até 9 meses. As amostras só apresentaram perdas significativas de massa a partir da temperatura de 400°C, tanto para amostras virgens como para amostras degradadas. Nota-se que essas amostras são mais resistentes a acréscimos de temperatura que às amostras de PVC.

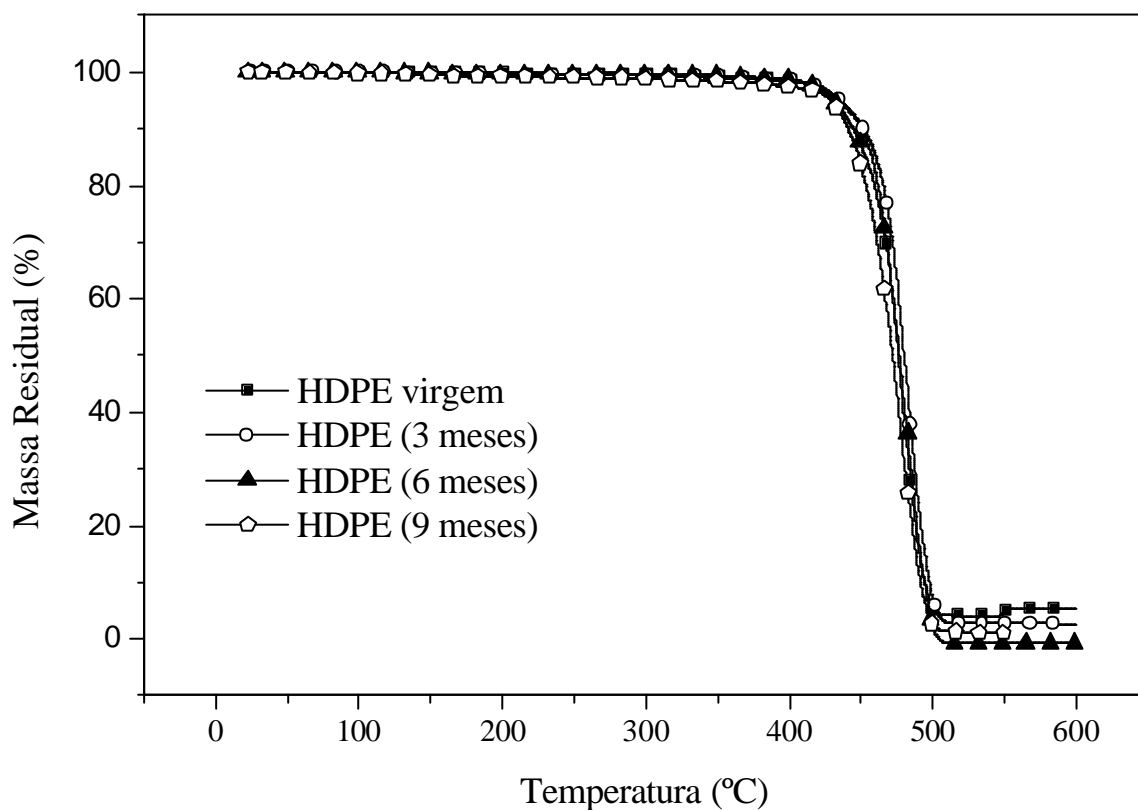


Figura 5.22 – Curvas TG em amostras de GM/C ($e = 1,0\text{mm}$) após imersão em GSC.

A Figura 5.23 apresenta as derivadas das curvas geradas no ensaio de Termogravimetria (DTG). Observa-se que os pontos que apresentam maiores picos de perdas de massa estão entre as temperaturas de 450 e 500°C, tanto para a amostra virgem assim como para as amostras que permaneceram em imersão.

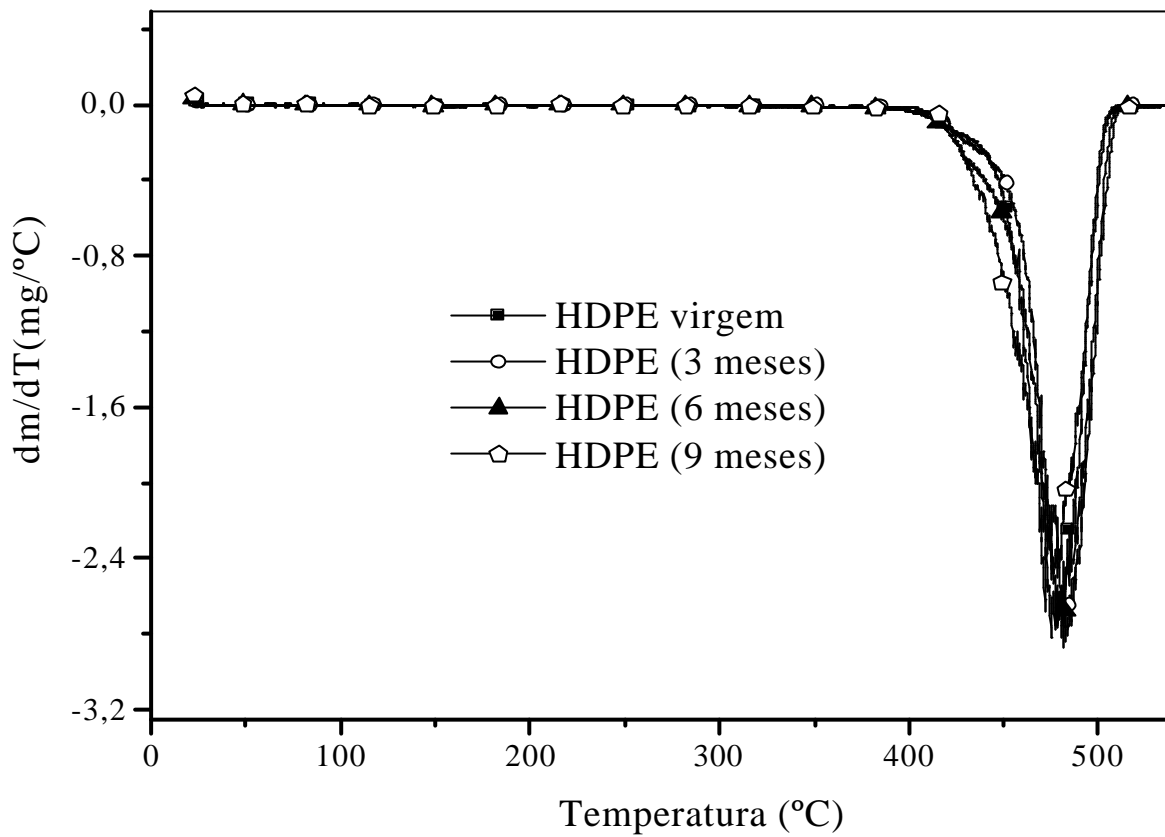


Figura 5.23 - Curvas DTG para geomembranas GM/C virgem e após imersão no fluido GSC.

5.3.5) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TG PARA GEOMEMBRANAS GM/D APÓS VARIADOS TEMPOS DE IMERSÃO EM FLUIDOS AGRESSIVOS

a) Fluido: Gasolina comum (GSC)

A Figura 5.24 apresenta o resultado do ensaio de TG para amostras de geomembranas de PEAD com 2,0mm de espessura, virgem e após imersão no fluido GSC. As amostras apresentaram perdas de massa mais significativas a partir dos 400°C assim como observado para as amostras de GM/C. Para as temperaturas inferiores ocorreram perdas de massa muito pequenas.

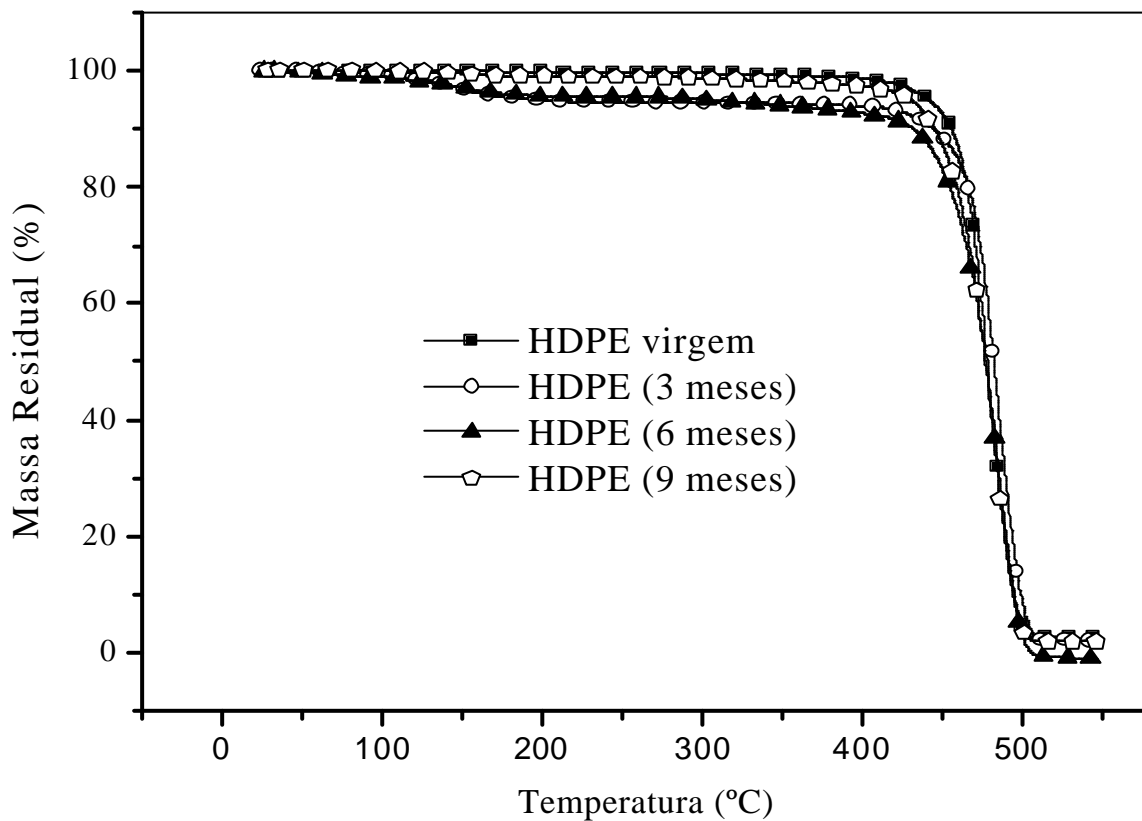


Figura 5.24 – Curvas TG em amostras de GM/D (e = 2,0mm) após imersão em GSC.

A Figura 5.25 apresenta as derivadas das curvas resultantes do ensaio de termogravimetria (DTG). Verifica-se que os pontos de maiores perdas de massa das amostras estão entre as temperaturas de 450 e 500°C.

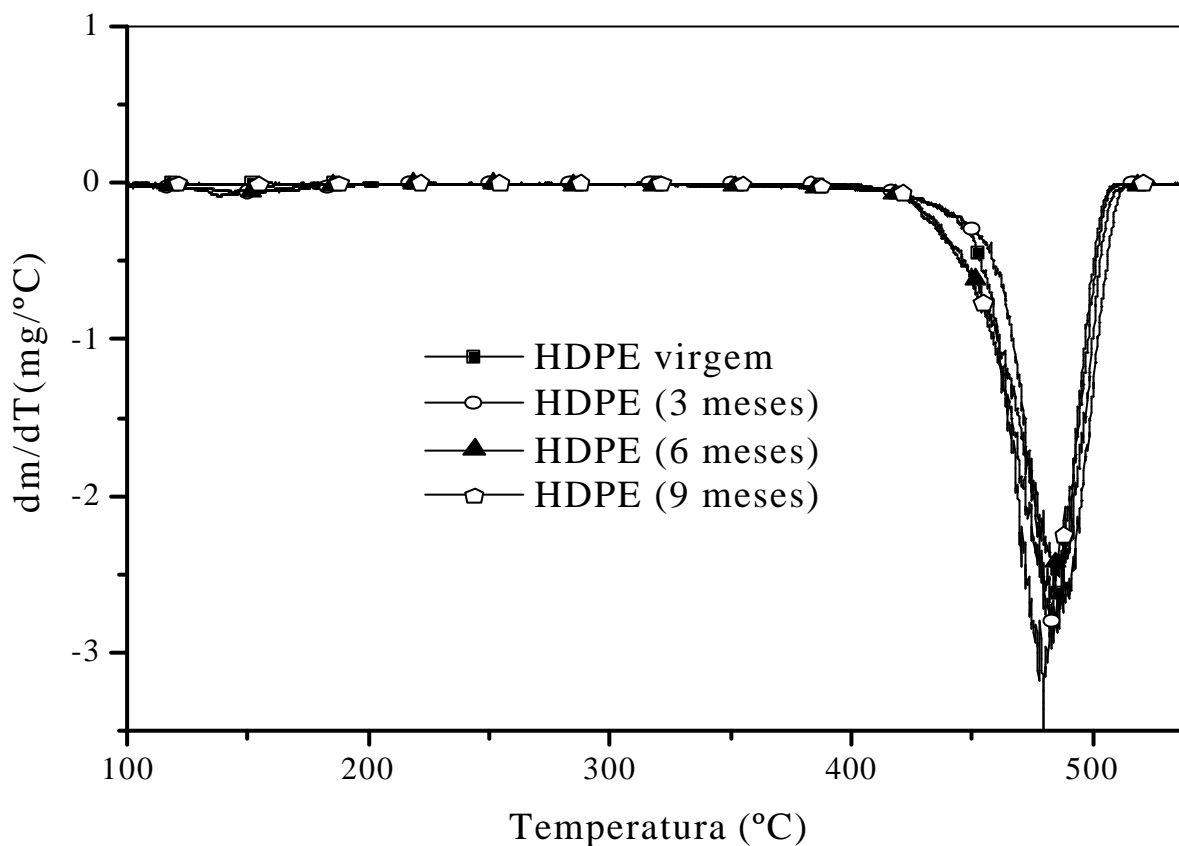


Figura 5.25 - Curvas DTG para geomembranas GM/D virgem e após imersão no fluido GSC.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados de temperaturas de decomposição e perdas de massa observados no ensaio de TG para amostras de geomembranas de PEAD com 2,0mm de espessura (GM/D). Percebe-se que as amostras possuem apenas uma temperatura de decomposição.

Tabela 5.9-Valores das temperaturas de decomposição (T_d) e perda de massa das amostras de GM/D imersas no fluido GSC.

Amostra	T_{d1} (°C)	Perda de massa (%)
Virgem	479	96
3 meses	485	98
6 meses	485	95
9 meses	482	98

5.4) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ANÁLISE MICROSCÓPICA EM AMOSTRAS DE GEOMEMBRANAS VIRGENS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA

As Figuras 5.26 e 5.27 apresentam a superfície das geomembranas GM/A (lado fosco) antes da imersão nos fluidos agressivos estudados nesta pesquisa. Essas imagens foram retiradas do MEV e as resoluções aplicadas foram de 100 e 350 vezes o tamanho real (área de aproximadamente 1,0 cm²) das amostras. Percebe-se que as amostras virgens não apresentam aspecto completamente homogêneo em termos de coloração. Nota-se que na superfície das amostras existem alguns pontos com menor coloração.

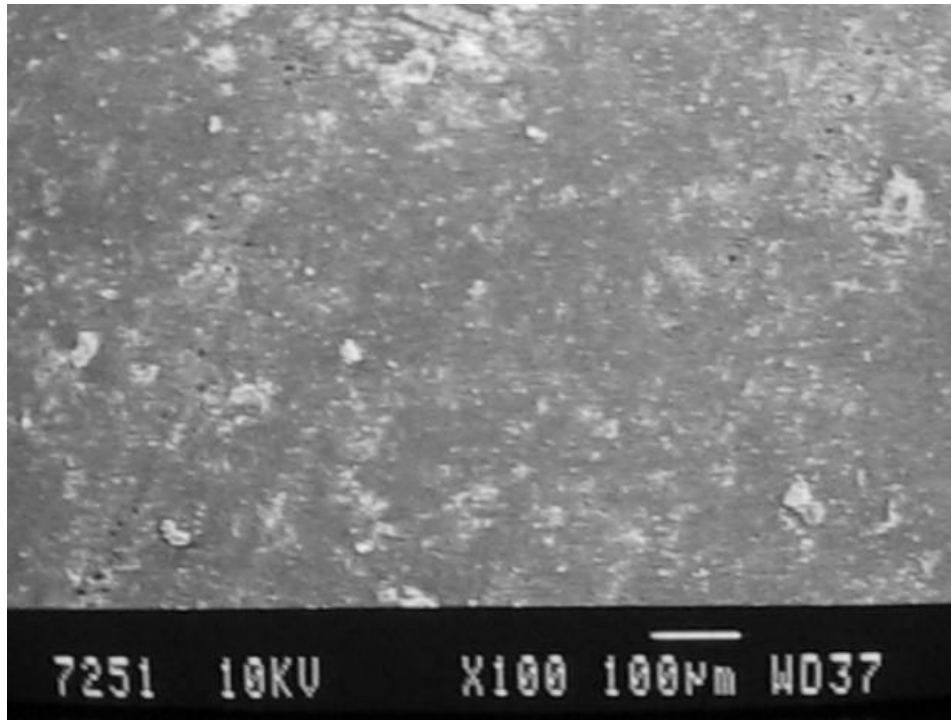


Figura 5.26 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 100 vezes – lado fosco).

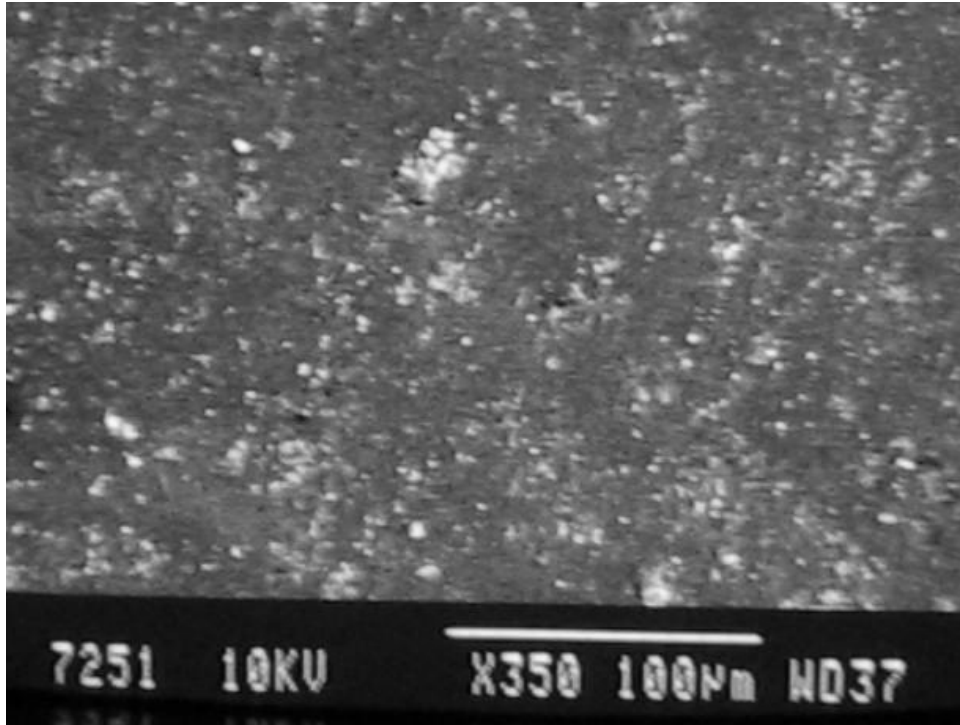


Figura 5.27 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 350 vezes – lado fosco).

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam o aspecto das amostras de GM/A (lado fosco) após 24 meses de imersão no fluido SC50. Percebe-se que o contato entre o fluido SC50 e as amostras alterou bastante o aspecto das geomembranas, surgiram grandes áreas de alteração.

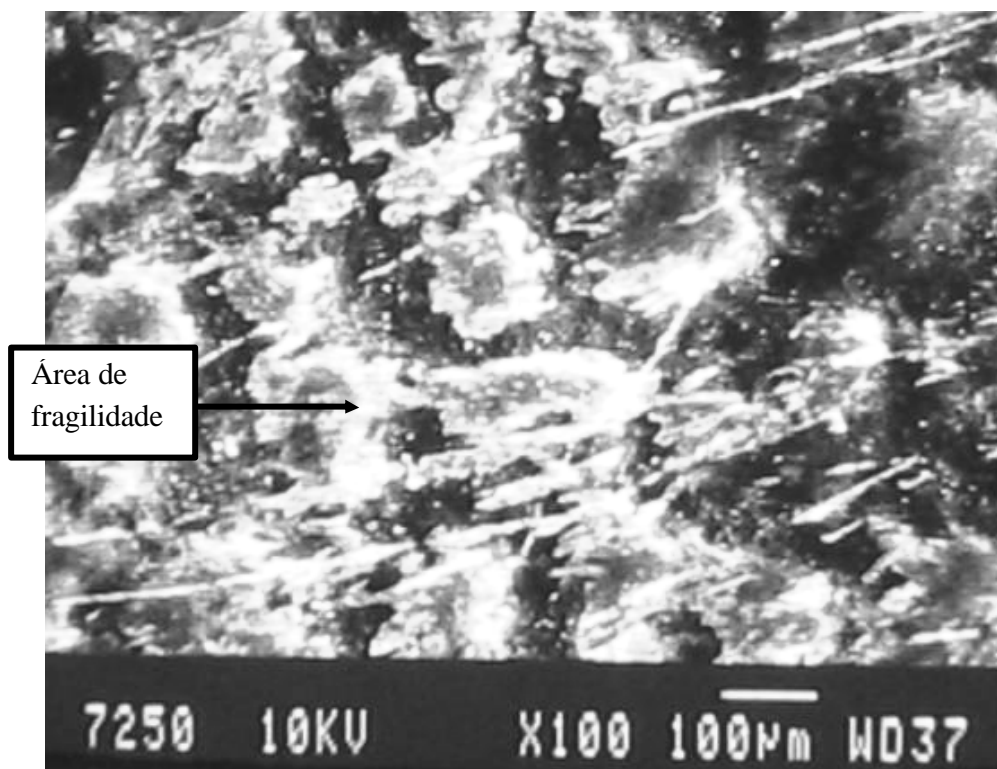


Figura 5.28 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado fosco).

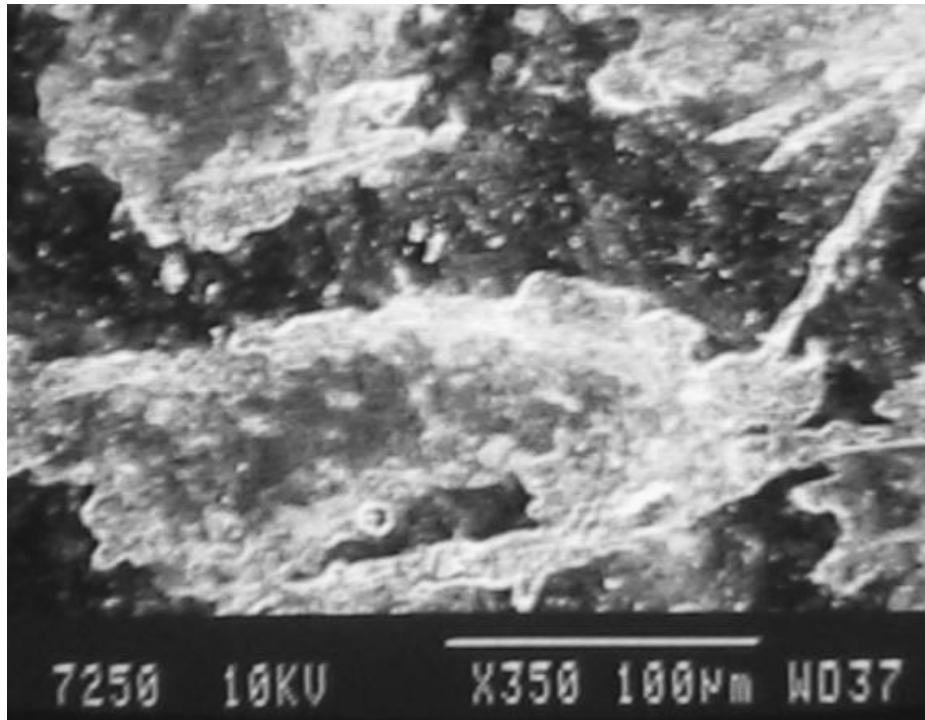


Figura 5.29 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50
(Aumento de 350 vezes – lado fosco).

As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam o aspecto da superfície de geomembranas GM/A (lado brilhante) antes da imersão no fluido SC50, nas resoluções de 100 e 350 vezes o tamanho real das amostras. As amostras apresentam poucas ranhuras.

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam o aspecto dessas amostras após o contato com o fluido SC50, pelo tempo de 24 meses para as resoluções de 100 e 350 vezes o tamanho real das amostras. Comparando esses resultados, pode-se perceber que as superfícies das amostras após a imersão foram bastante alteradas.

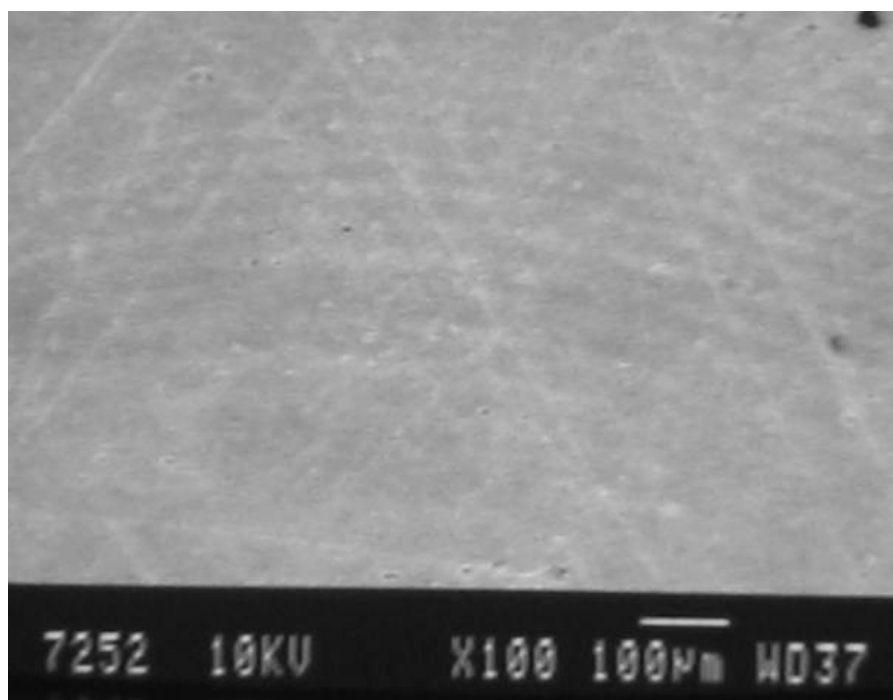


Figura 5.30 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 100 vezes – lado brilhante).

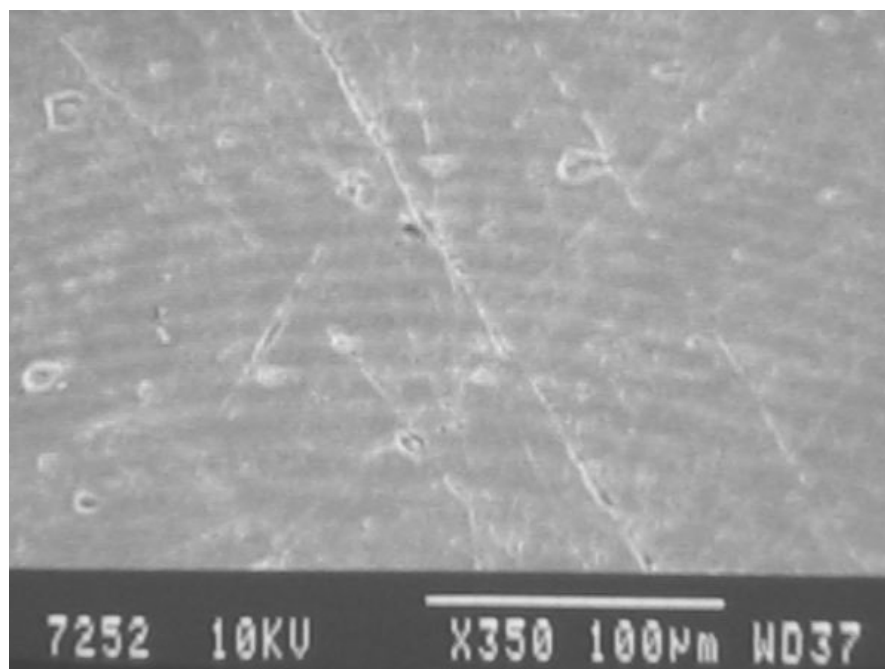


Figura 5.31 – Superfície de geomembrana GM/A virgem (aumento de 350 vezes – lado brilhante).

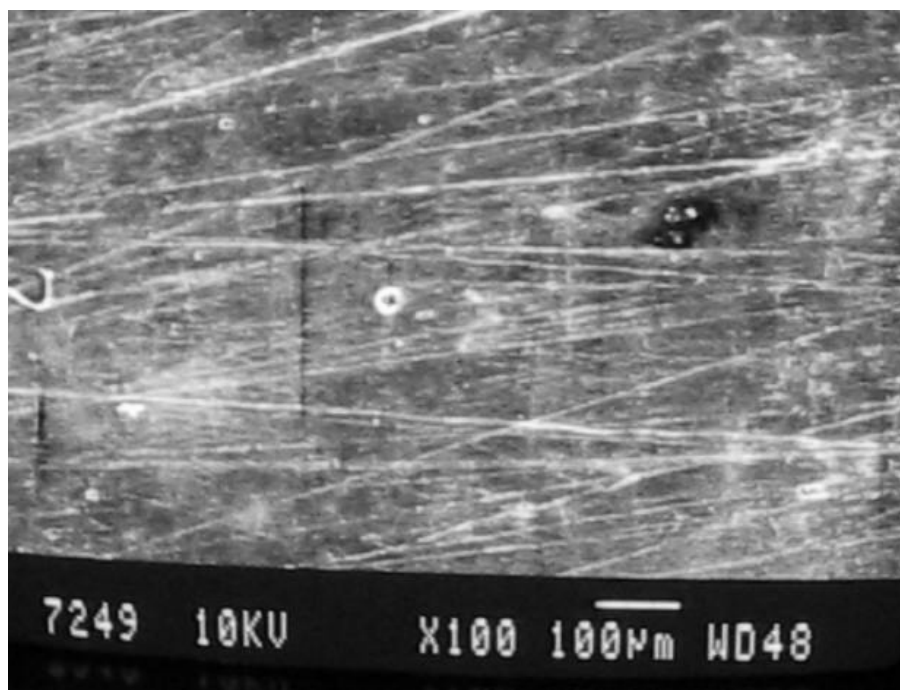


Figura 5.32 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado brilhante).

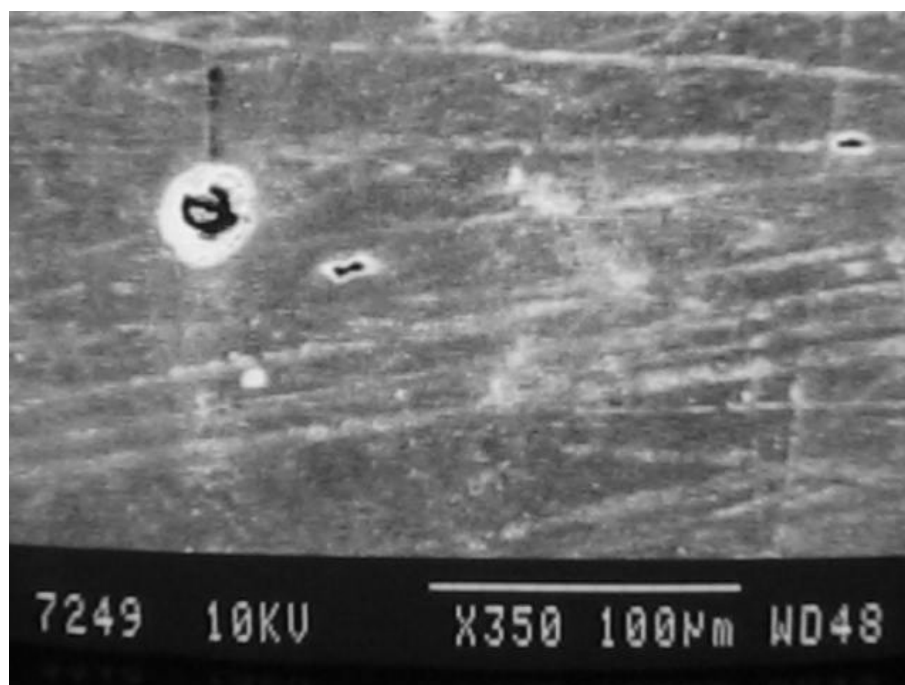


Figura 5.33 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado brilhante).

As Figuras 5.34, 5.35, 5.36 e 5.37 apresentam o aspecto das superfícies das geomembranas GM/A após imersão no fluido GSC pelo período de 24 meses. As imagens apresentadas nas figuras 5.34 e 5.35 são da superfície brilhante das amostras e as figuras 5.36 e 5.37 são imagens da superfície fosca. Percebe-se que ocorreram alterações na superfície nos dois lados da amostra.

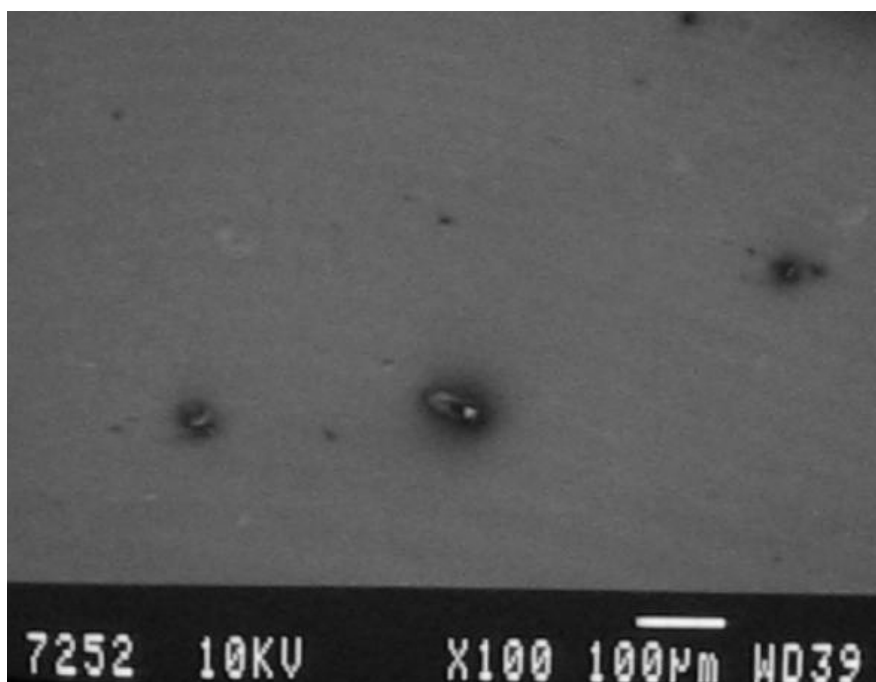


Figura 5.34 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 100 vezes – lado brilhante).

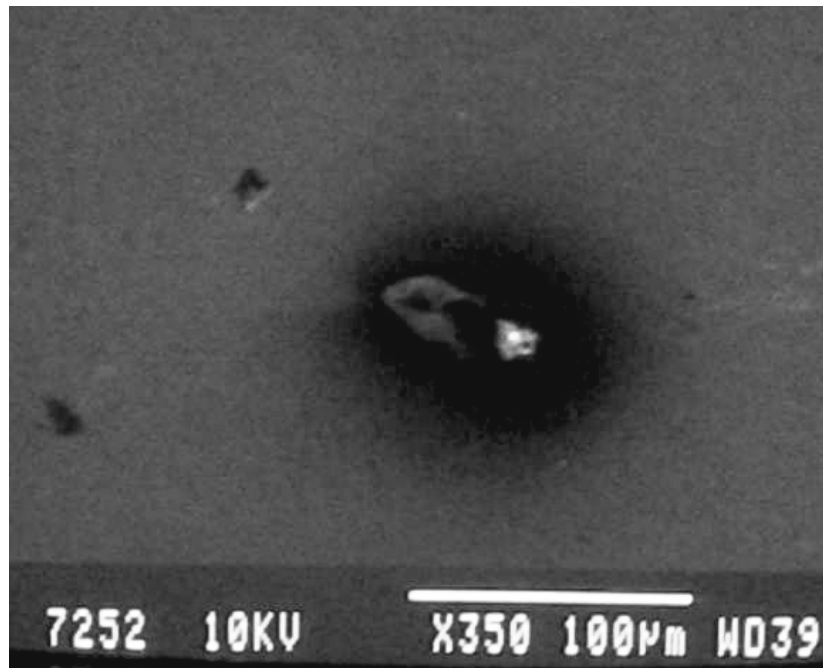


Figura 5.35 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 350 vezes – lado brilhante).

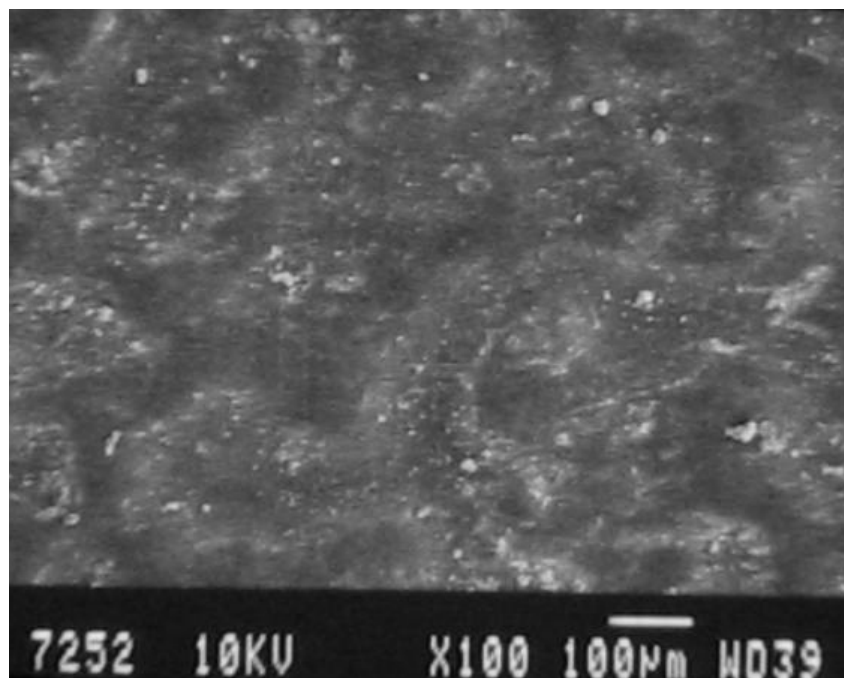


Figura 5.36 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 100 vezes – lado fosco).

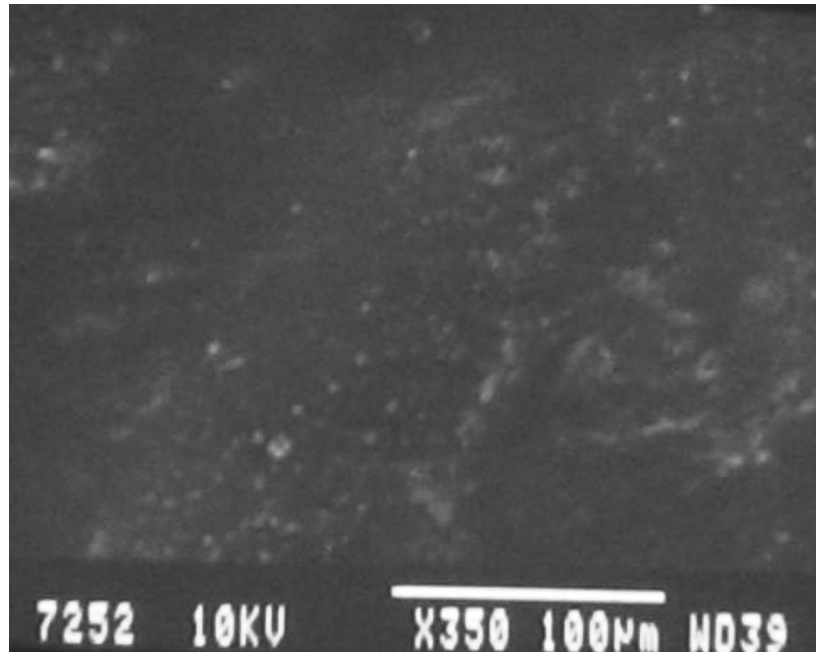


Figura 5.37 – Superfície de geomembranas GM/A após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 350 vezes – lado fosco).

As Figuras 5.38 e 5.39 apresentam a superfície das geomembranas GM/B (lado fosco) antes da imersão nos fluidos agressivos. Essas imagens também foram retiradas do MEV, nas resoluções de 100 e 350 vezes o tamanho real (área de aproximadamente 1,0 cm²) das amostras. Percebe-se que as amostras virgens também não apresentam aspecto completamente homogêneo em termos de coloração.

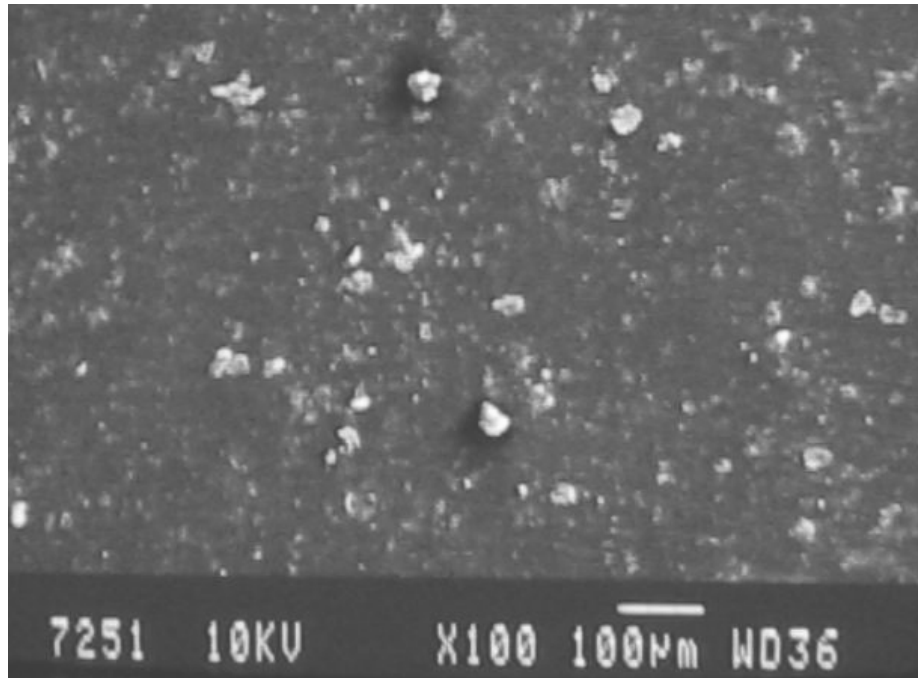


Figura 5.38 – Superfície de geomembrana GM/B virgem (aumento de 100 vezes – lado fosco).

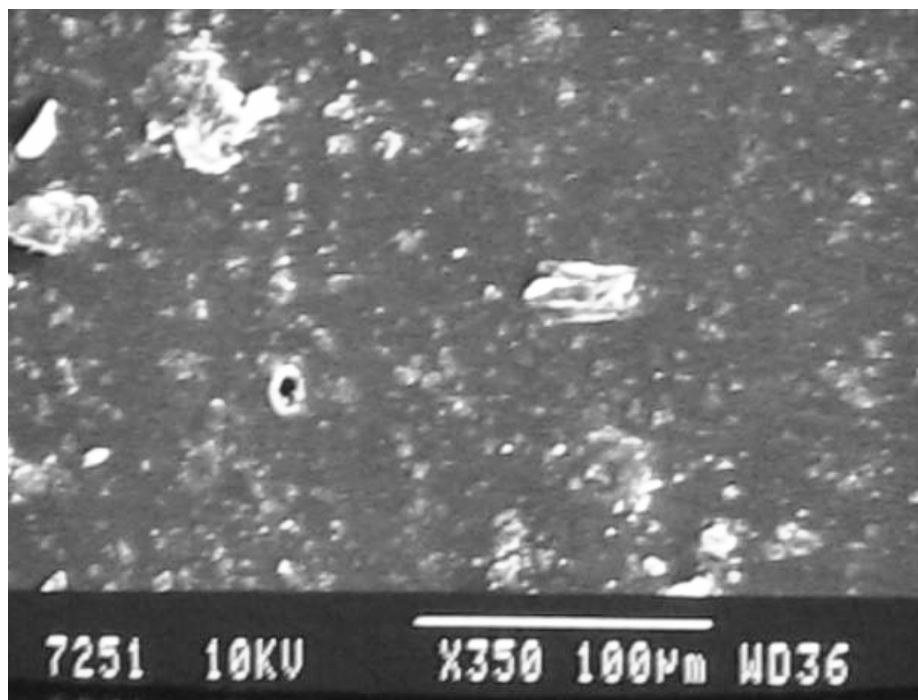


Figura 5.39 – Superfície de geomembrana GM/B virgem (aumento de 350 vezes – lado fosco).

As Figuras 5.40 e 5.41 apresentam o aspecto das amostras de GM/B após imersão no fluido SC50 pelo período de 24 meses, para resoluções de 100 e 350 vezes maior que o tamanho real (área = 1,0 cm²) das amostras. Observam-se ranhuras e áreas disformes na superfície das amostras, provavelmente devido ao desgaste causado por meio do contato fluido/amostra para o intervalo de tempo estudado.

As Figuras 5.42 e 5.43 apresentam o aspecto das amostras de GM/B após imersão no fluido GSC pelo período de 24 meses, para resoluções de 100 e 350 vezes maior que o tamanho real (área = 1,0 cm²) das amostras. Percebe-se que os aspectos das superfícies das amostras foram diferentes dos observados para as amostras que foram degradadas com o fluido SC50 (Figuras 5.40 e 5.41). Segundo uma inspeção visual o fluido SC50 causou maiores danos às amostras que o fluido GSC para o tempo de imersão estudado.

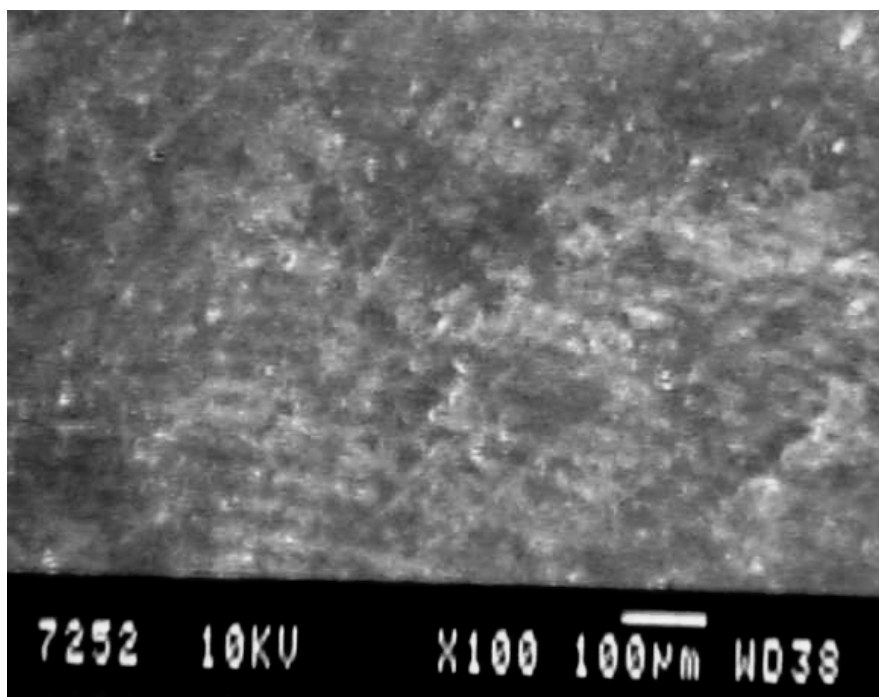


Figura 5.40 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado fosco).

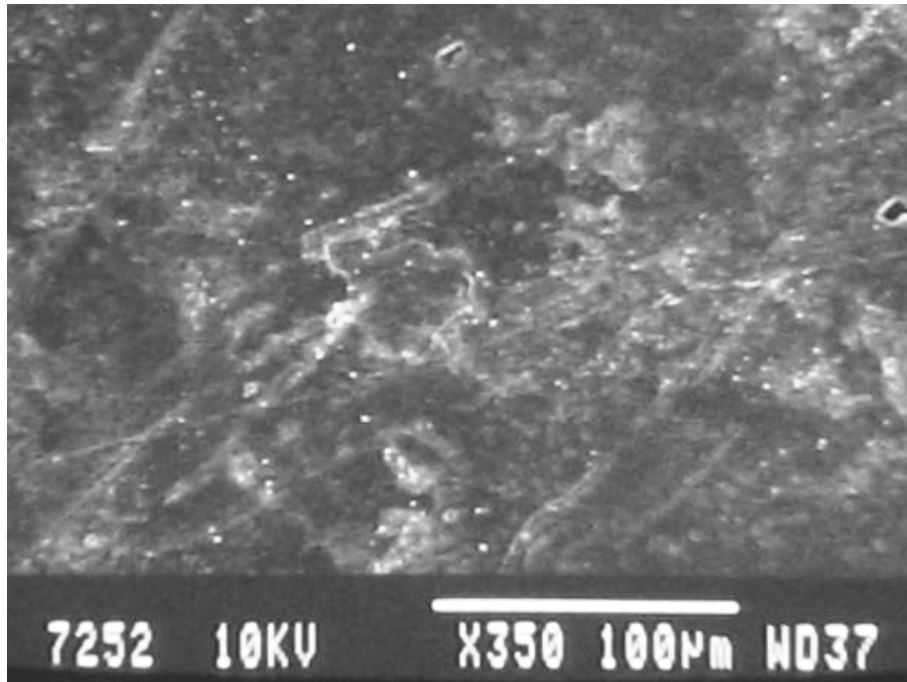


Figura 5.41 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado fosco).

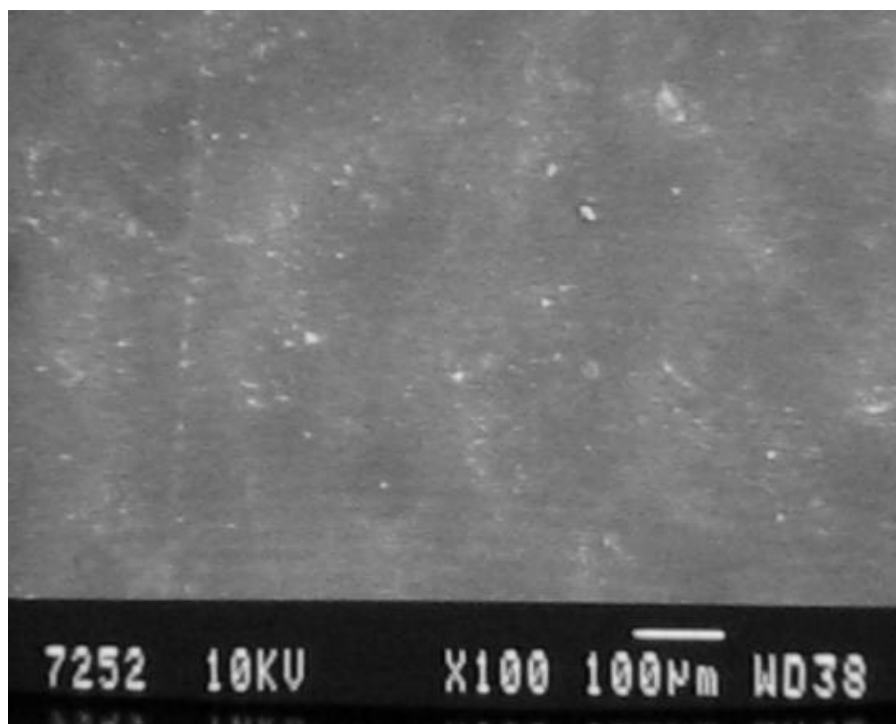


Figura 5.42 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 100 vezes – lado fosco).

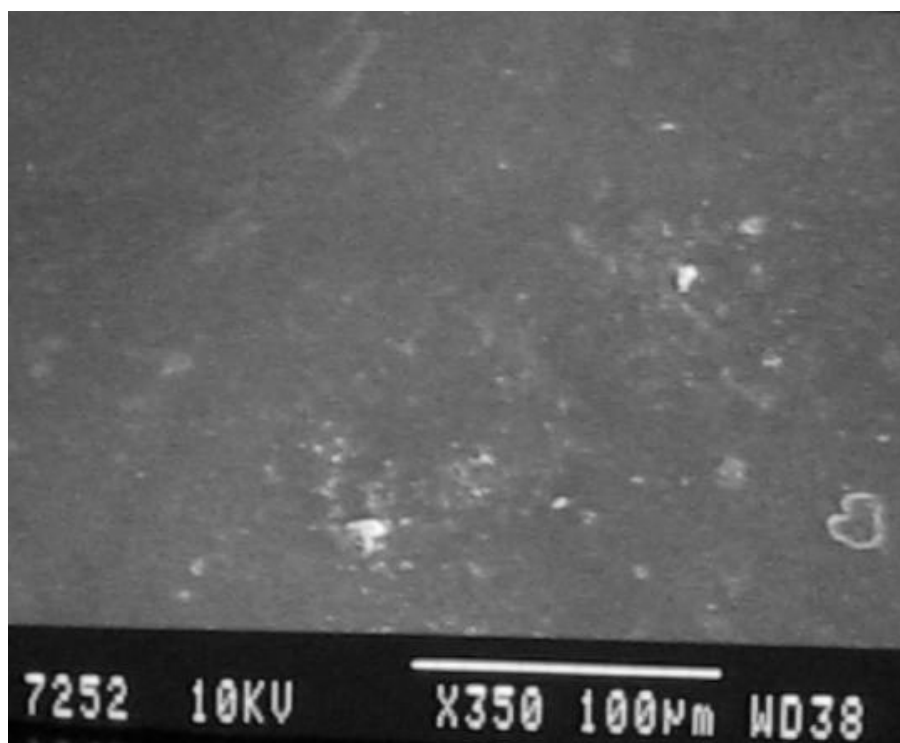


Figura 5.43 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido GSC (Aumento de 350 vezes – lado fosco).

As Figuras 5.44 e 5.45 apresentam o aspecto da superfície de amostras de GM/B (lado brilhante) após imersão em SC50 pelo período de 24 meses (Resoluções de 100 e 350 vezes o tamanho real (área = 1,0 cm²) das amostras). Percebe-se que o contato entre os fluidos SC50 e GSC alteram o aspecto das superfícies das amostras, independente da espessura das amostras. Observa-se que ocorrem reações químicas no conjunto fluido/amostra que causam danos diferentes à integridade das geomembranas.

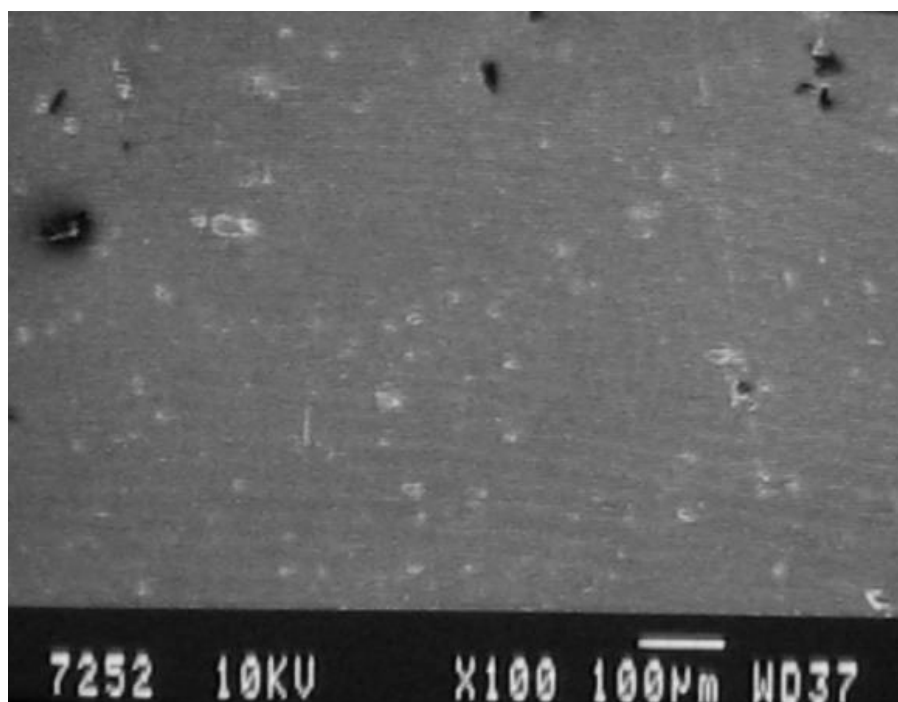


Figura 5.44 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 100 vezes – lado brilhante).

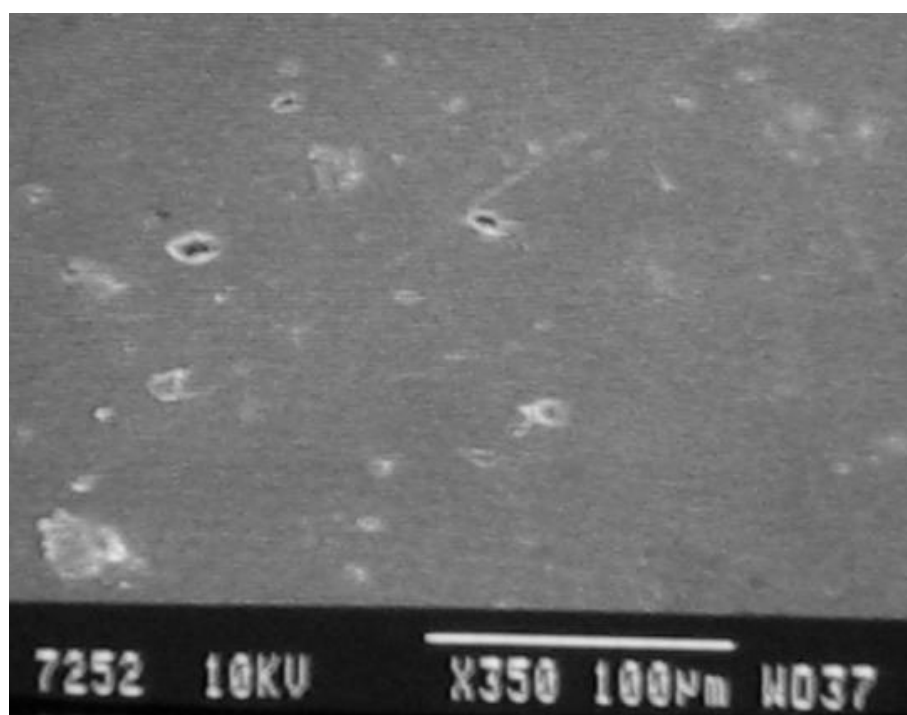


Figura 5.45 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 350 vezes – lado brilhante).

Ns Figuras 5.46, 5.47 e 5.48 apresentam o aspecto da superfície de amostras de geomembranas virgem e após contato com os fluidos GSC e SC50 pelo período de 24 meses. Essas imagens foram adquiridas por meio de microscópio comum com a resolução de 40 vezes o tamanho real das amostras. Percebe-se que as imagens apresentadas anteriormente, obtidas por meio do MEV foram mais apropriadas para este estudo, pois apresentaram mais detalhes.

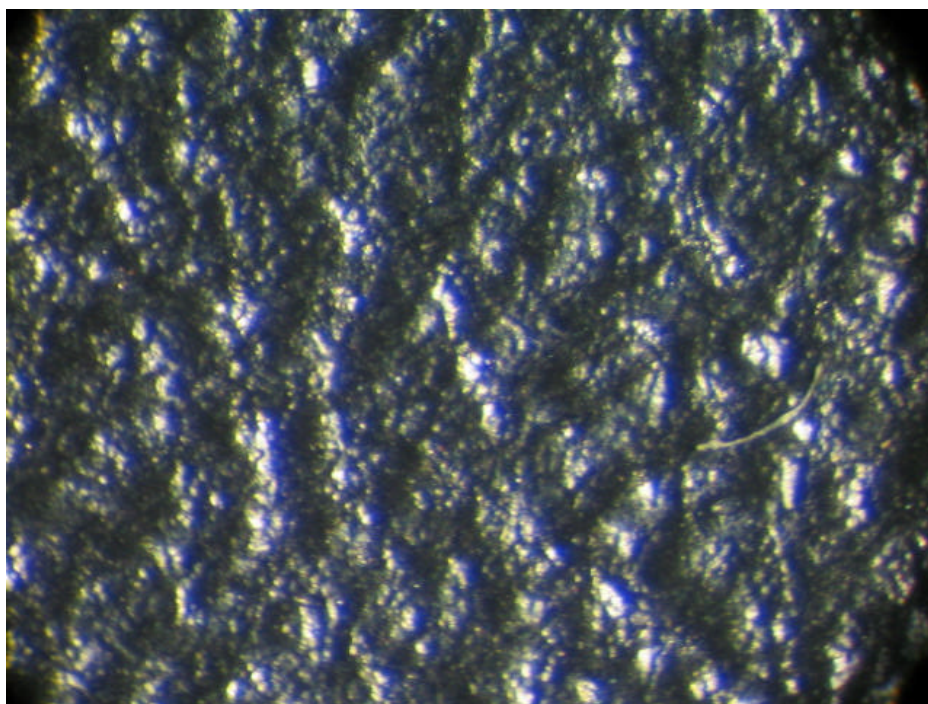


Figura 5.46 – Superfície de geomembranas GM/B virgem (Aumento de 40 vezes – lado brilhante).

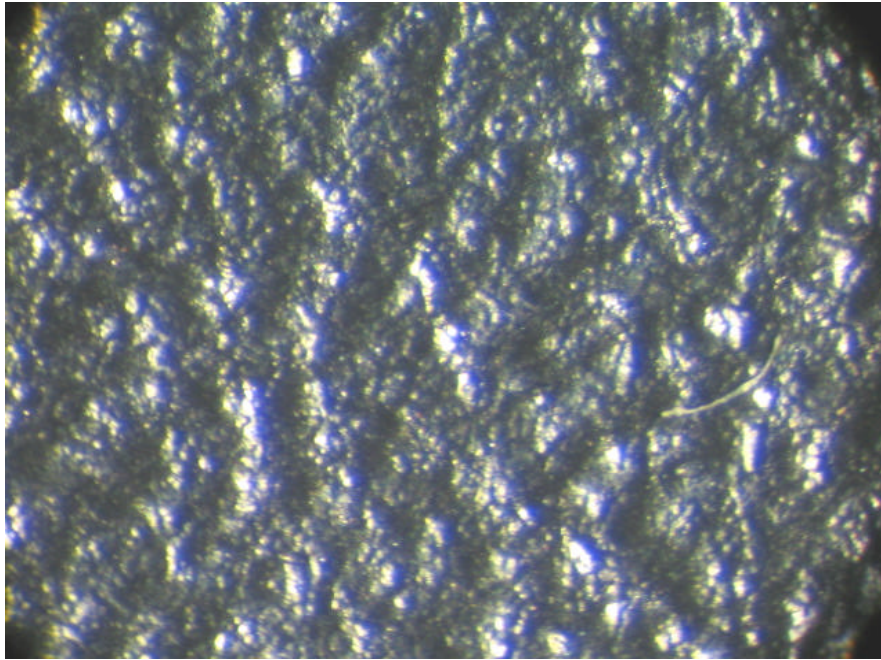


Figura 5.47 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido SC50 (Aumento de 40 vezes – lado brilhante).

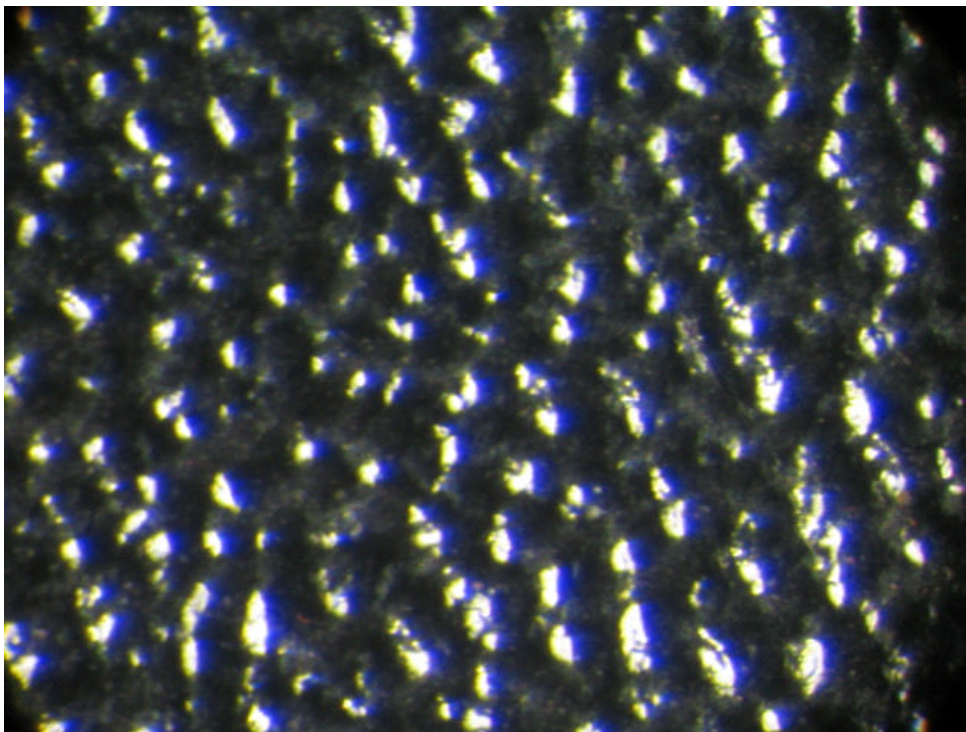


Figura 5.48 – Superfície de geomembranas GM/B após 24 meses de imersão no fluido GSC
(Aumento de 40 vezes – lado brilhante).

5.5) RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO SIMPLES EM AMOSTRAS DE GEOMEMBRANAS VIRGENS E APÓS DEGRADAÇÃO QUÍMICA

5.5.1) Fluido agressivo: Gasolina comum (GSC)

As Figuras 5.49 e 5.50 apresentam os resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/A e GM/B, virgens e após variados tempos de imersão no fluido GSC. Percebe-se que as amostras virgens apresentam maior capacidade de deformação.

Para as amostras de GM/A, nota-se que após determinados tempos de imersão, essa capacidade de deformação reduziu consideravelmente, em torno de 81% para as amostras que permaneceram em imersão por 12 meses e 50% para as amostras que permaneceram em imersão pelo período de 3 meses.

Para as amostras de GM/B os resultados foram diferentes. Nota-se que após 3 meses de imersão, as amostras aumentaram a capacidade de deformação e a Resistência à Tração Simples. No entanto, esse resultado possivelmente deve-se às reações entre amostra e fluido. Conforme citado em análises anteriores, todas as amostras após imersão no fluido GSC tornaram-se mais enrijecidas. Esse fenômeno pode ter causado os aumentos de capacidade de deformação e resistência à tração das amostras de GM/A e GM/B.

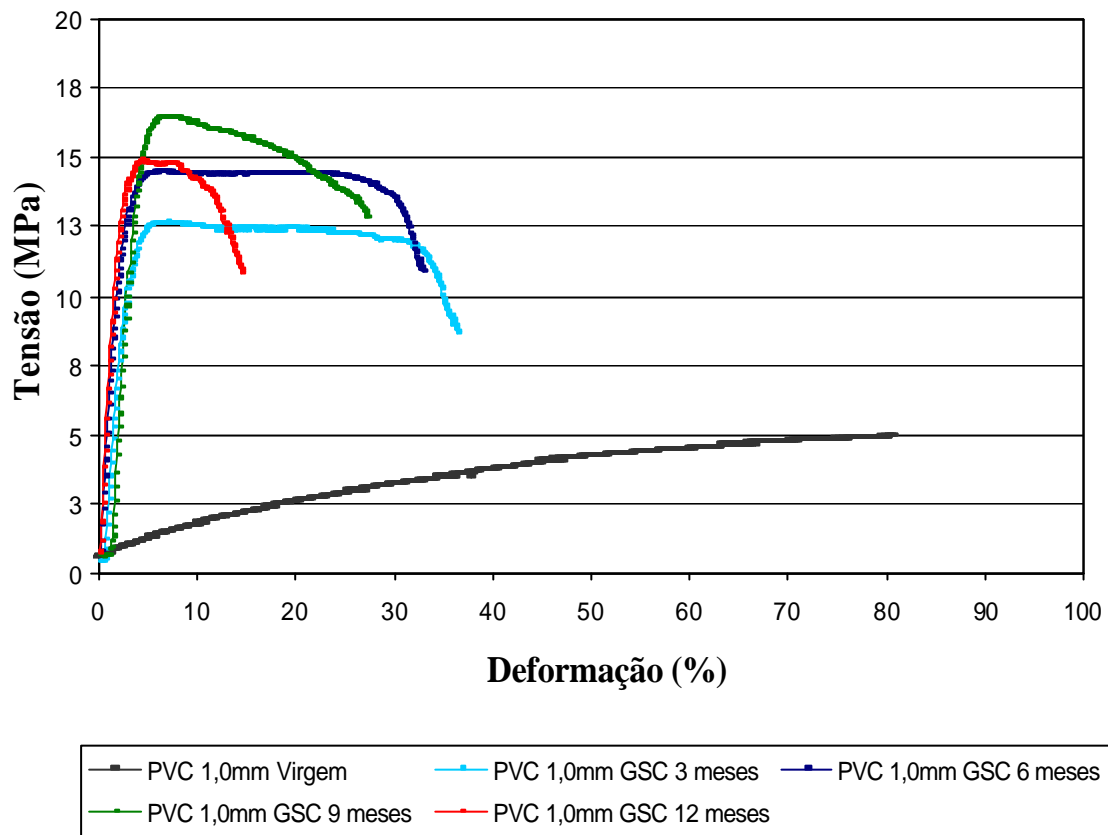


Figura 5.49– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/A virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.

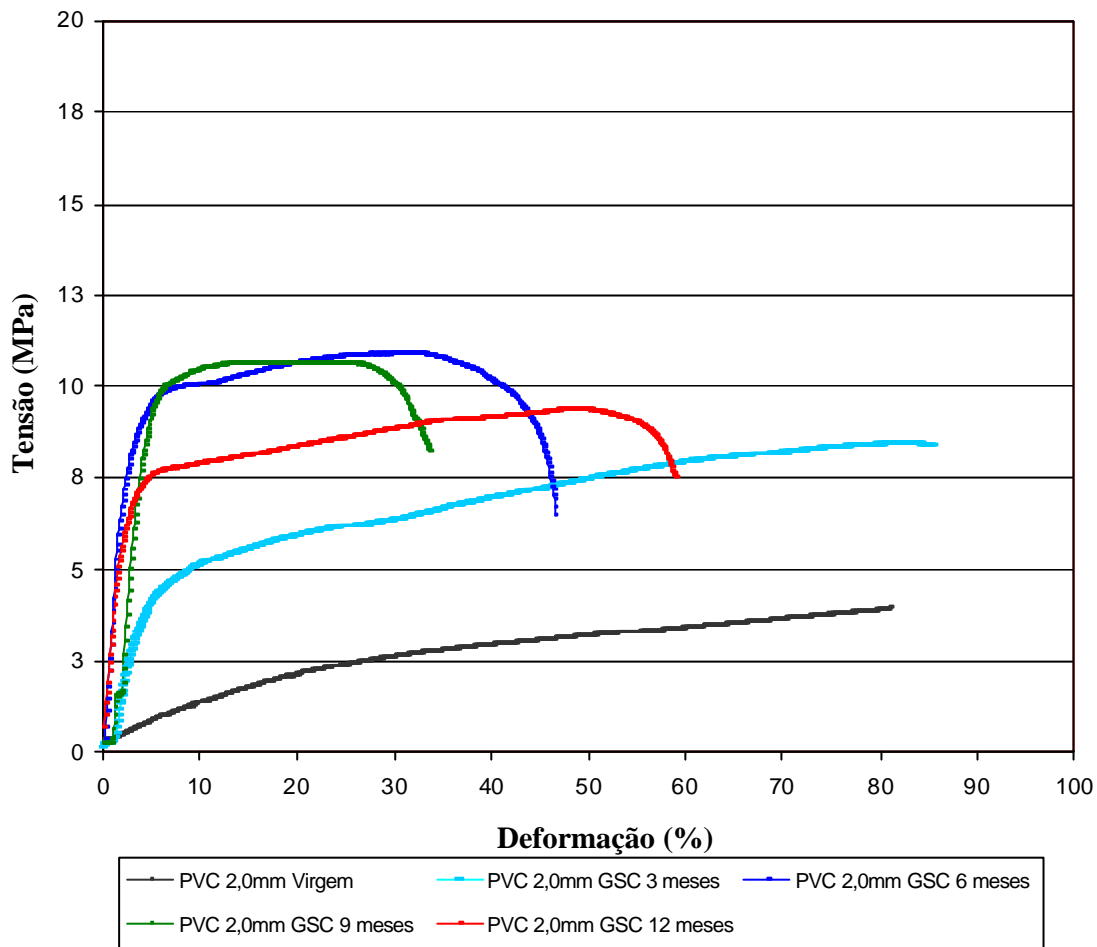


Figura 5.50– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/B virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.

As Figuras 5.51 e 5.52 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à tração simples para as geomembranas GM/C e GM/D, antes e depois a degradação química. Observa-se na figura 5.51 que as amostras virgens apresentam uma média de valores para tensão máxima em torno de 13MPa, e após a imersão no fluido GSC pelos períodos de 3 até 12 meses esses valores oscilaram entre 11MPa, para as amostras que permaneceram em imersão por 3 meses, e 14MPa para as amostras que permaneceram em imersão por 6 meses. Comparando os resultados entre as amostras degradadas e as amostras virgens, percebe-se que para o primeiro intervalo de tempo (3 meses), as amostras perderam em torno de 15% em resistência à tração e ganharam 47% de

capacidade para deformação. No entanto, para o intervalo de tempo de 6 meses, as amostras ganharam em torno de 11% em resistência à tração simples e dobraram a capacidade de deformação.

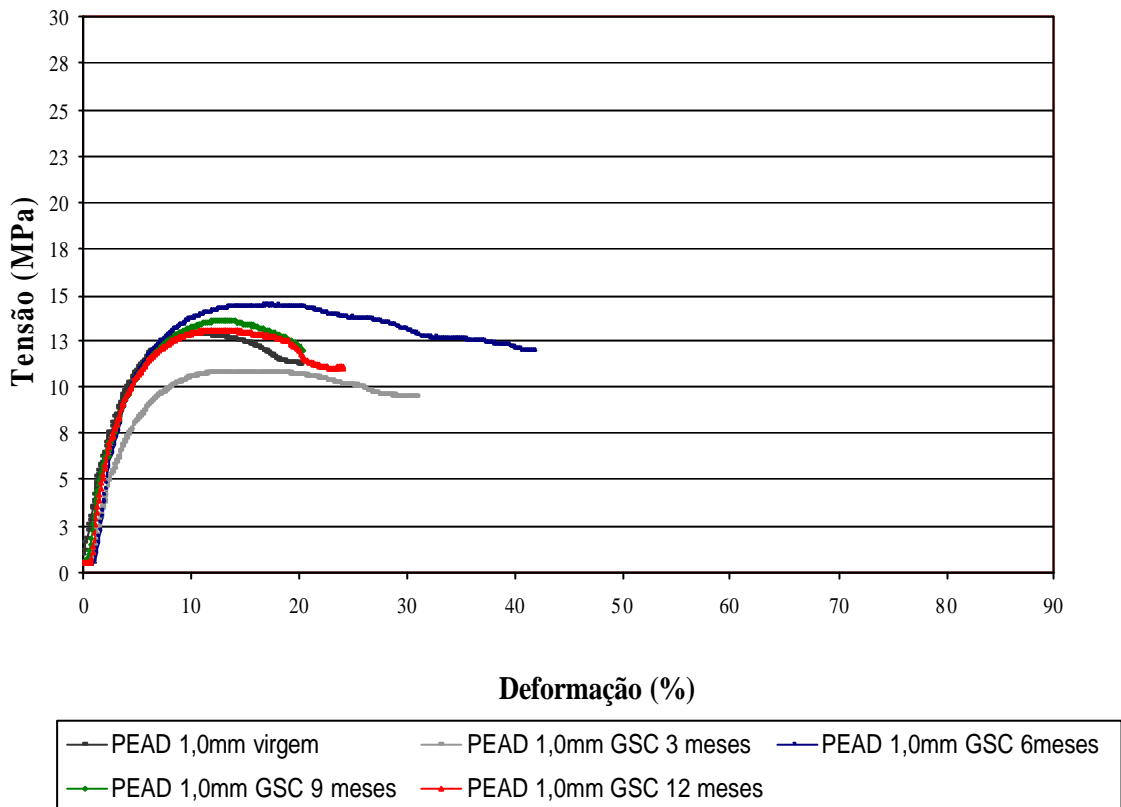


Figura 5.51– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/C virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.

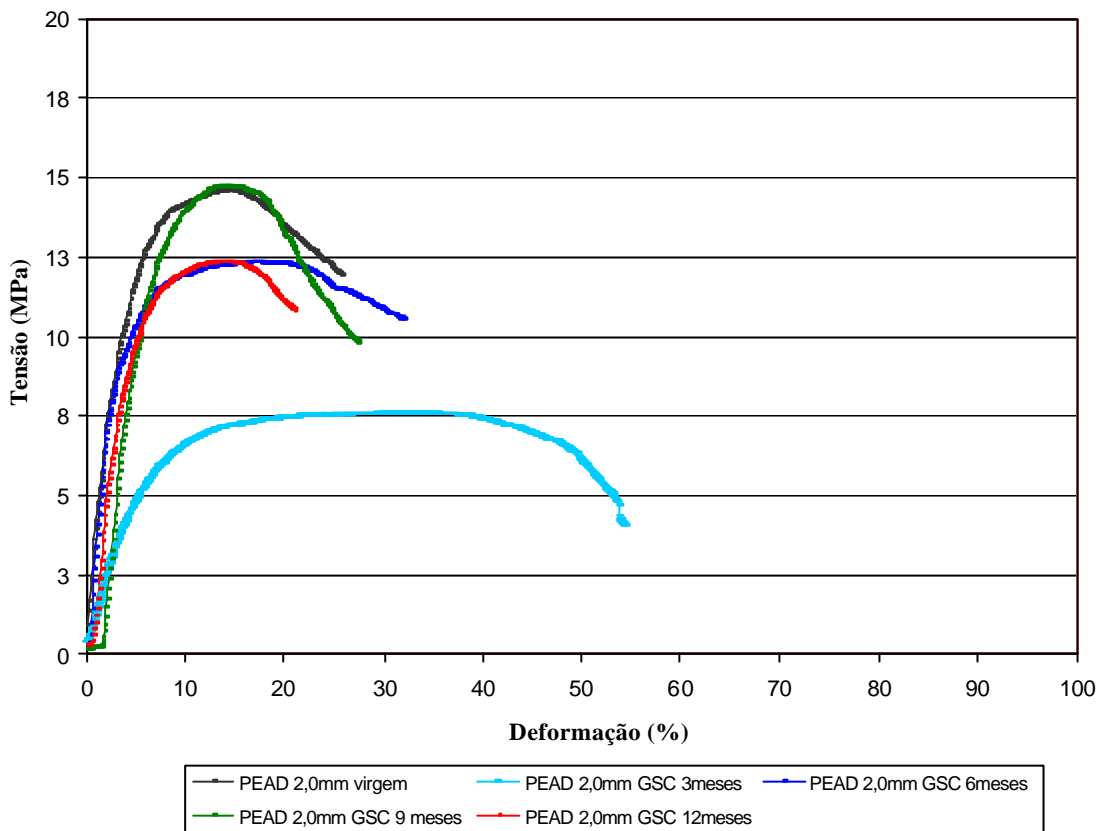


Figura 5.52– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/D virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido GSC por variados tempos.

5.5.2) Fluido agressivo: Soda cáustica diluída em água (proporção de 50% de água e 50% de soda) - (SC50)

As Figuras 5.53 e 5.54 apresentam os resultados do ensaio de RTS para amostras de geomembranas de PEAD virgens com espessuras de 1,0 e 2,0mm após imersão no fluido SC50 pelos períodos de 9 e 12 meses. Percebe-se que as amostras virgens apresentaram maiores tensões de escoamento que às amostras submetidas à imersão e que a deformação foi reduzindo com o acréscimo do tempo de imersão. Para as amostras de GM/A virgens a deformação máxima permaneceu em torno dos 55%, enquanto que para as amostras degradadas, tanto para o tempo de

9 como para 12 meses, a deformação não ultrapassou os 35%, ou seja as amostras após o contato pelos intervalos em estudo perderam aproximadamente 20% de capacidade de deformação.

Quanto à tensão de escoamento, para os 9 meses de imersão, observou-se uma queda de 12MPa para 11MPa em torno dos 20% de deformação. Para o tempo de imersão de 12 meses, percebe-se que as amostras não conseguiram atingir sequer 10MPa de tensão de escoamento e que esses índices de redução de escoamento foram reduzindo gradativamente com a redução da capacidade de deformação das amostras.

Na Figura 5.54 nota-se que as variações de tensão de escoamento foram bastante aproximadas, observa-se para o intervalo de 9 meses que as amostras atingiram tensão de escoamento de aproximadamente de 13,5 MPa, enquanto que para as amostras que permaneceram em imersão pelo tempo de 12 meses essa tensão de escoamento foi inferior a 13,0MPa. As diferenças de capacidade de deformação entre as amostras antes e após imersão foram mais significativas, variaram entre 20 e 35%, sendo que a deformação maior é atribuída às amostras virgens e a menor às amostras que permaneceram em imersão pelo tempo de 12 meses.

Não foram realizados ensaios de RTS em amostras de GM/A e GM/B após imersão no fluido SC50 devido à indisponibilidade de espaço físico para aglomerar as amostras. Esses ensaios são sugeridos para pesquisa futuras no último capítulo deste trabalho.

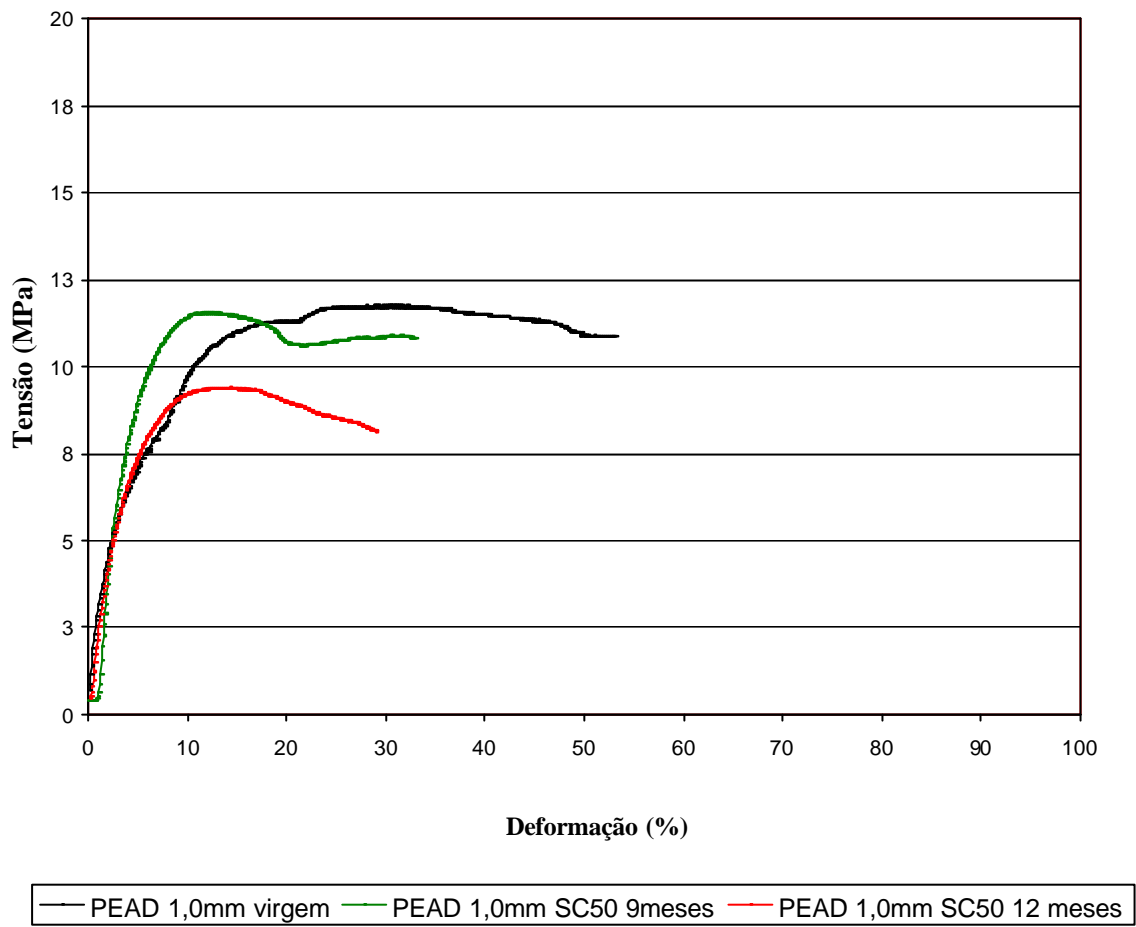


Figura 5.53– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/C virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido SC50 por variados tempos.

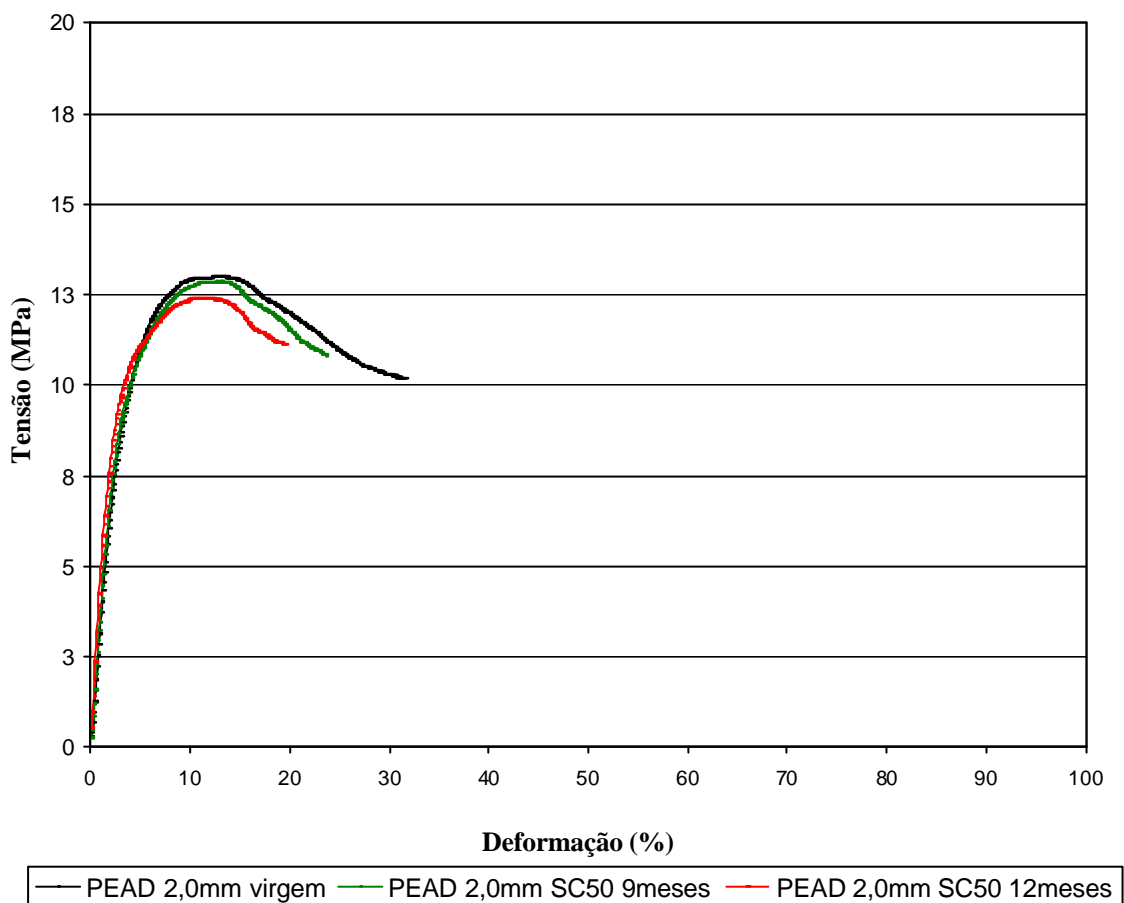


Figura 5.54– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/D virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido SC50 por variados tempos.

5.5.3) Fluido agressivo: Álcool diluído em água (proporção de 3% de água e 97% de álcool - ALC97)

A Figura 5.55 apresenta os resultados do ensaio de RTS para amostras de geomembranas de PVC com 2,0mm de espessura, virgens e após imersão em álcool diluído em água, numa proporção de 97% de álcool e 3% de água. As amostras virgens apresentaram tensão de escoamento menor que às amostras que foram submetidas à imersão no fluido ALC97. Esse comportamento demonstra que após a imersão as amostras sofreram variações significativas em suas composições. Após 3 meses de imersão, as amostras dobraram em tensão de escoamento e permaneceram com

deformações em torno de 80%. Para o intervalo de imersão de 6 meses, a tensão de escoamento aumentou de aproximadamente 4,0MPa para 12,0MPa e a deformação em torno de 50%.

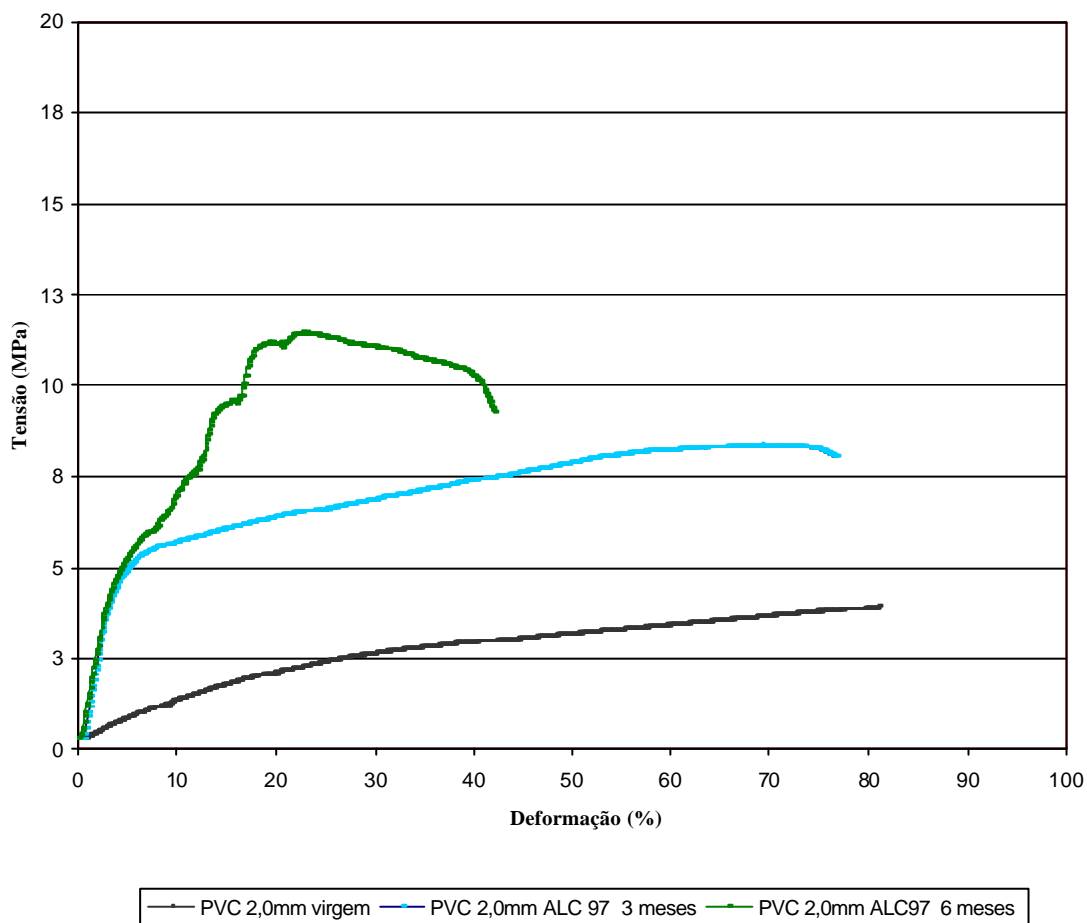


Figura 5.55– Resultados do ensaio de RTS para amostras de GM/B virgem e amostras que permaneceram em imersão no fluido ALC97 por variados tempos.

CAPÍTULO VI

6) CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1) CONSIDERAÇÕES FINAIS

As alternativas de engenharia ditas não convencionais estão a cada dia ocupando maiores espaços em projetos, principalmente na área ambiental. Essas alternativas deverão ser empregadas somente quando o profissional tiver segurança no comportamento do material indicado sob condições de serviço. Para muitos profissionais, os geossintéticos se enquadram entre os materiais de construção alternativos. Tais materiais vêm cada vez mais sendo utilizados em obras de proteção ambiental, particularmente nas de disposição de resíduos. Nestas aplicações é de fundamental importância a avaliação da durabilidade destes produtos, particularmente os disponíveis no mercado nacional, quando submetidos ao contato direto com substâncias poluentes e agressivas.

Essa tese estudou o comportamento de alguns geossintéticos que vêm sendo empregados em obras de proteção ao meio ambiente, no que se refere à degradação quando em contato com diferentes substâncias. Foi realizado um grande número de ensaios de compatibilidade química entre geotêxteis e geomembranas e diferentes líquidos. As amostras de geossintéticos foram submersas nestes líquidos por diferentes intervalos de tempo, sendo posteriormente submetidas a ensaios mecânicos, químicos e a microscopia eletrônica de varredura. As principais conclusões obtidas no programa de ensaios são apresentadas a seguir.

Quanto aos Equipamentos e Metodologias de Ensaio Empregados

Os equipamentos e metodologias mostraram-se adequados aos propósitos da pesquisa. Devido à necessidade de elevado tempo de imersão das amostras nos fluidos agressivos e à limitação de tempo da tese, só foi possível a realização de um número limitado de ensaios em amostras submetidas a tempos maiores de imersão. A preparação das amostras para ensaios e alguns ensaios também demandaram tempo e, por vezes, conhecimento que não fazem parte da formação tradicional dos engenheiros civis.

Comportamento dos Geotêxteis Ensaaiados

Os materiais utilizados mesmo possuindo gramaturas variadas e marcas diferentes apresentaram comportamento bastante semelhante, principalmente no que diz respeito a degradação química. Percebeu-se que mesmo com a gramatura de alguns materiais sendo o triplo de outro, essa característica não influenciou no mecanismo de degradação do material.

As amostras de geotêxteis, submetidas à imersão em gasolina comum e álcool diluído em água na proporção de 97% de álcool e 3% de água não apresentaram perdas de resistência à tração simples maiores que 40% enquanto que todos os geotêxteis que foram submetidos a imersão nos fluidos que continham soda cáustica apresentaram perdas de até 98% na resistência a tração.

Os fluidos agressivos foram capazes de causar reações que degradaram completamente as amostras, variando somente, o tempo de ação dos fluidos e a diluição em função do produto ensaiado. Para a gasolina comum (GSC) e o álcool diluído em 3% de água, os geotêxteis, em geral, não apresentaram grandes perdas de resistência à tração simples e de deformabilidade. Porém, para os fluidos que possuíam soda cáustica diluída, os produtos geotêxteis ensaiados demonstraram bastante fragilidade, independente do fabricante e/ou gramatura.

Quanto às análises termogravimétricas, os geotêxteis degradados estudados apresentaram variações significativas quando comparados às amostras virgens. Esses resultados, aliados aos obtidos com os ensaios de resistência à tração simples, demonstram que a utilização de geotêxteis em obras de proteção ambiental onde haverá contato direto com fluidos como gasolina comum, soda cáustica ou álcool, deverá ser avaliada antecipadamente. A utilização de geotêxteis como os ensaiados na presente tese, poderá ser inadequada, dependendo da quantidade do fluido que entrará em contato com esse geossintético e do período em que esse material irá permanecer em contato com o fluido agressivo. Muitas vezes, o geossintético não permanecerá em contato com soda cáustica pura, no entanto uma pequena porcentagem de soda cáustica pode degradar de forma significativa o geotêxtil.

Nesta pesquisa também foram realizados alguns ensaios em amostras de geotêxteis exumadas de obras reais. Esses resultados não foram apresentados devido à pequena quantidade de ensaios,

que não foram suficientes para a obtenção de conclusões mais consistentes. No entanto, percebeu-se que é importante a compatibilização de ensaios em amostras exumadas e ensaios de laboratório.

Comportamento das Geomembranas

As geomembranas utilizadas foram de fabricantes e espessuras diferentes. Os resultados para as amostras de PVC submetidas à degradação por imersão em diferentes fluidos foram bastante diferentes dos apresentados para as amostras de PEAD. As geomembranas com predominância de PVC, após imersão em gasolina comum (GSC) por variados tempos, enrijeceram e perderam massa. Esse fenômeno implica em algum tipo de reação entre fluido e amostra, que é prejudicial ao desempenho da geomembrana, pois, compromete a sua flexibilidade. Quanto à imersão em soda cáustica diluída em 50% de água (SC50), essas perdas de massa foram menores, porém também existiram e comprometeram a integridade das amostras. A verificação de enrijecimento após contato com as substâncias utilizadas nesta pesquisa não foi realizada para as amostras de PEAD devido à indisponibilidade de amostras desse tipo de produto no início da pesquisa.

Os ensaios de termogravimetria apresentaram grande variabilidade para as geomembranas em função do tipo de geomembrana e das condições de ensaio. Percebeu-se que em alguns casos ocorreram inclusive menores perdas de massa com o acréscimo de temperatura em amostras degradadas quando comparadas às amostras virgens. No entanto, cabe salientar que esse comportamento não pode ser considerado satisfatório, pois esse fenômeno é decorrente de variações na estrutura das amostras ensaiadas, que mais tarde possivelmente será prejudicial ao seu desempenho.

Os ensaios de resistência à tração simples realizados nas geomembranas de PVC após imersão nos fluidos, GSC e álcool diluído em 3% de água (ALC97) confirmaram o enrijecimento das amostras. Quanto às amostras de PEAD, esse enrijecimento também foi observado para todos os fluidos.

As análises microscópicas apresentadas mostraram que resíduos dos fluidos permaneceram impregnados às amostras, mesmo após ciclos de lavagem. Possivelmente, algumas reações continuaram a ocorrer após a retirada das amostras da imersão dos fluidos agressivos.

6.2) SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Ensaios de compatibilidade química em amostras de geotêxteis de um número maior de fabricantes, com composições químicas diferentes, para posteriores comparações;
- Ensaios mecânicos em amostras degradadas mecânica e quimicamente;
- Utilização de outros fluidos agressivos nos ensaios de compatibilidade química de geossintéticos;
- Ensaios de análise termomecânica utilizando a sonda de penetração;
- Verificação da estrutura dos geossintéticos após degradação química (imersão em fluidos agressivos) por meio de raio-X;
- Utilização do ensaio de infravermelho nos fluidos após contato com as amostras de geossintéticos;
- Realização de ensaios de dano mecânico em geossintéticos degradados quimicamente;
- Ensaios em amostras de geossintéticos exumadas de obras reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 12568, (1992). Geotêxteis – Determinação da Gramatura. ABNT, São Paulo, 2p.
- ABNT NBR 12593, (1992). Geotêxteis – Determinação da Espessura. ABNT, São Paulo, 2p.
- ABRAMENTO, M. (1995). Durabilidade e Comportamento de Longo Prazo de Geossintéticos - Parte 11- Durabilidade dos Materiais, São Paulo - II Simpósio de Aplicações de Geossintéticos, 227-235.
- ALLEN, T. M., (1991). Determination of Long-term Tensile Strength of Geosynthetics: a State-of-the-art review. In: Geosynthetics' 91 Conf. Atlanta, pp 350-380.
- ARTIERES, O., GOUSSÉ, F. & PRINGENT, E (1997). Laboratory-Ageing of Geomembranes in Municipal Landfill Leachates.
- ASTM E831-06 Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Material by Thermomechanical Analysis.
- ASTM E928-03 Standard Test Method of Purity by Differential Scanning Calorimetry.
- ASTM E831-06 Standard Test Method for Temperature Calibration of Differential Scanning Calorimeters and Differential Thermal Analyzers.
- AZAMBUJA, E., (1994). Investigação de Dano Mecânico em Geotêxteis não Tecidos. UFRGS – CPGEC, Dissertação de Mestrado.
- AZAMBUJA, E., (1995). A Influência do Dano Mecânico na Tensão Admissível dos Geossintéticos em Estruturas de Solos Reforçados. III Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia – Geossintéticos' 1999, 150-170.
- AZAMBUJA, E., (1997). Determinação da Resistência Admissível dos Geossintéticos Empregados como Reforço em Muros ou Taludes Íngremes. Curso Sobre Aplicação de Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente, pp E1 -E19.
- BILLING, . J. W., (1990). Greenwood, J. H., Small, G. D. Chemical and Mechanical Durability of Geotêxtil. In IV International Conferation on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague. Vol. 2, pp 620-625.
- BRAND, E. W., RICHARD PANG, P. L., (1991). Durability of Geotextiles to Outdoor Exposure in Hong Kong. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. Vol. 117. n° 7, pp 979-1000.
- BRUNE, M., Ranke, H. G., Collins, H. J., Harnet, H. H. (1991). Incrustation Processes Indrainage Systems of Sanitary Landfills, Sardinia' 91, III Int. Land. Symp. Sta Margherita di Pula, Itália, pp 1000-1034.

BUSH, D. I., (1988). Evaluation of the Effects of Construction Activities on the physical Properties of Polimeric Soil Reiforcing Elements. International Geotchnical Symp. On Theory and Practice of Earth Reinforcement, Fukuoka, pp 63-68.

CANEVAROLO, S. V. (2003). Técnicas de Caracterização de Polímeros, Artliber, São Paulo, pp 210-112.

Collins, H. J., (1993). Impact of the Temperature Inside the Landfill on the Behavior of Barrier Systems, Sardinia' 93. IV Int. Land. Symp., pp417-432.

CHRISTOFER, BR. & HOLTZ, R. D., (1985). Geotextile Engeneering Manual. Federal Highway Admistration, National Highway Institute. DC, 917p.

ELIAS, V. (1990). V Durability/Corrosion os Soil Reinforced Structures. Federal Highway Adminstration, pp 89-183.

ENGEPOL S.A. (2000). Polimantas Polietileno de Alta Densidade. Manual Técnico. 30p.

GAMSKI, K. (1998). Durability of Geotextiles. Introduction. RUEM the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structure. Great Britan, pp 215-221.

GIROUD, J. P. and BEECH, J. F. (1989). Stability of Soil Layers on Geosytethics liners Systems. Proc. Geosynthetics' 89. Volume I, San Diego, USA. pp 35-45.

GIROUD, J. P. and PEGGS, I., D., (1990). Geomembrane Construction Quality Assurance. ASCE – Geotechnical Special Publication. Waste Containment System Construction, Regulation and Performance. Edited by Rudolph Bonarpare. N° 26, pp 180-220.

GRUBB, D. G., CHENG, S.C.J., SABANAS, R. M. (2000). Comparison of Geotextiles Durability to Outdoor Exposure Conditions in the Peruvian Andes and the Southern USA. Geosynthetics International. Vol. 7, nº 1, 23-45.

JOHN, NWM (1987). Geotêxtiles. Blackie and Son Ltda. Glascow and London, 345p.

KOERNER, R., HALSE, Y. H. and LORD JR, A., E., (1990). Long-Term Durabililitys and Ageing of Geomembranes. ASCE – Geotechnical Special Publication. Waste Containmente System Construction, Regulation and Performance. Edited by RudolphBonapare. N° 26, pp 100-130.

KOERNER, R. (1992). Designing with Geossinthetics. Second Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA, 652p.

KOERNER, R. (1994). Designing with Geossinthetics. 3rd Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 83p.

LUCAS, E. F., SOARES, B. G., MONTEIRO, E. (2001). Caracterização de Polímeros. Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. e-papers. pp 217-323.

MATHEUS, E. (2002). Efeito do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintéticos. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-010A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 284p.

MCGOWN, A. (1978). The Properties of Nonwoven Fabrics Presently Identified as Being Important in Public Work Applications. Index 78 Programme, University of Strathclyde, Glasgow, Escócia, pp 12-76.

MILITON, C. (1993). Nouveau Concept Français Pour le Stockage de Dechets Industriels Spéciaux Ultimes et Stabilisés, GEOCONFINE' 93, Volume I, pp 545-550.

NASCIMENTO, M. T. (2002). Avaliação de Dano Mecânico em Geossintéticos em Obras de Disposição de Resíduos. Dissertação de Mestrado. Publicação G. DM-093A/02, 102p.

PALMEIRA, E. M. (1992). Geossintéticos: Tipos e Evolução nos Últimos Anos. I Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos '1992, pp 1-20.

PALMEIRA, E. M. (1998). Previsão e Desempenho de Geossintéticos em Obras Geotécnicas. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Volume 4. pp 150-162.

PANDOLPHO, J.R. & GUIMARÃES, D. G. (1995). Durabilidade de Geotêxteis de Poliéster Expostos ao Intemperismo. II Simpósio Brasileiro Sobre Aplicação de Geossintéticos em Geotecnia - Geossintéticos '1995. pp 209-216.

POHL, D. H. (1992). Geomembranas: Aplicações e Considerações Sobre Confiabilidade e Controle de Qualidade. 1º Simpósio Sobre Aplicações de Geossintéticos' 92, UnB, Brasília, pp 140-163.

RAINEY, T., BARKSDALE, R., (1993). Construction Induced Reduction in Tensile Strength of Polymer Geogrids. Geosynetics' 93 Conf. Vancouver, pp 729-742.

REDDY, D. V., NAVARRETE, F., LAI, P. (1999). Durability, Creep and Creep-Rupture, of Backfill Geogrid Reinforcement for Retaining Walls. III Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia.-Geossintéticos'99, pp 107-109.

ROSA, D. S. (1996). Correlação entre Envelhecimento Acelerado e Natural do Polipropileno Isostático (PPi). Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Química. UNICAMP, 232p.

VIEZEE, D. J., VOSKAMP, W., DEN HOEDT, G., TROOST, G. H., SCHMIDT, H. M., (1990). Designing Soil Reinforcement with Woven Geotextiles – the Effect of Mechanical Damage and Chemical Aging on long-term Performance of Polyester Fibres and Fabrics. IV Int. Conf. On Geotextiles, Geomembrane and Related Products. The Hague. Volume 2, pp 650-656.

VIDAL, D. M. VIEIRA, B. M. e MELO, J. L., (1991). Metodologia para Análise de Durabilidade de Geossintéticos Frente a Agentes Químicos. II Simpósio Sobre Barragens e Rejeitos e Disposição de Resíduos, Rio de Janeiro, pp 290-310.

VIDAL, D. M. & PADILHA, R. Q. (1995). Resistência a Tração não Confinada de Geotêxteis: Análise de Alguns Fatores de Influência. II Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia-Geossintéticos 1995, pp 81-189.

VIDAL, D. M. (1997). Geomembranas-Propriedades e Especificações. Curso Sobre: Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia e Meio-ambiental. IGS-Brasil, Porto Alegre, RS, Brasil, pp 3-34.

WATTS, G. R. A., BRADY, D. C., (1990). Site Damage Trials on Geotextiles. IV Int. Conf. On Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague. Volume 2, pp 603-607.

ANEXO I

ENSAIO DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO SIMPLES (RTS)

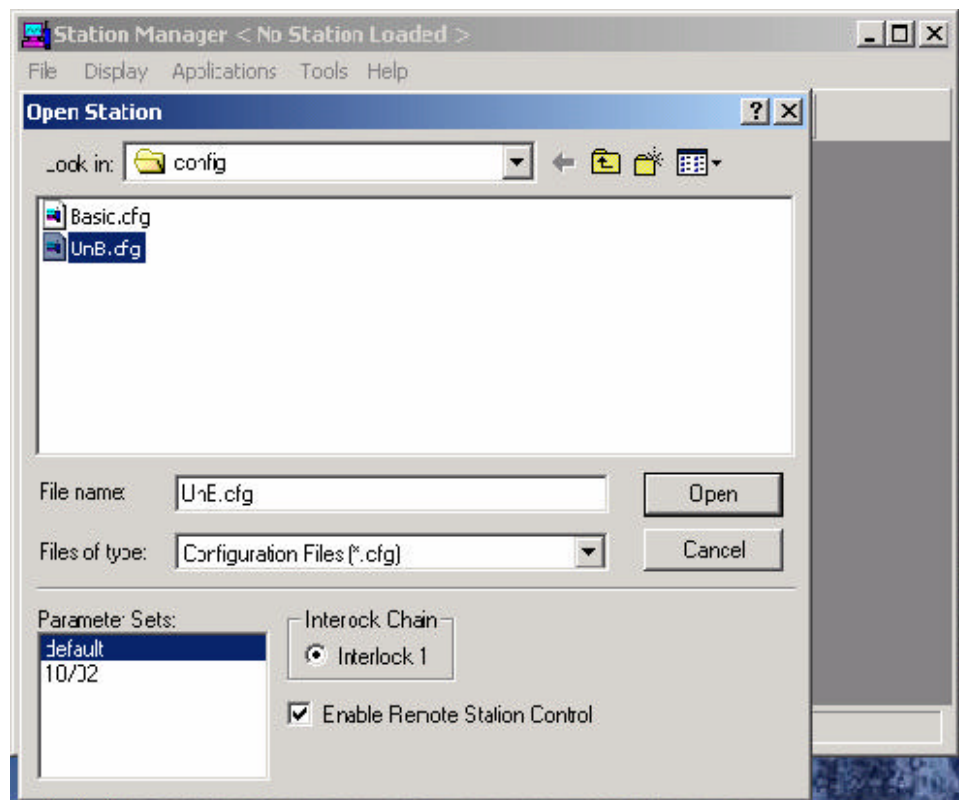


Figura 01-Tela Inicial para abertura do arquivo onde foram gravados os ensaios.

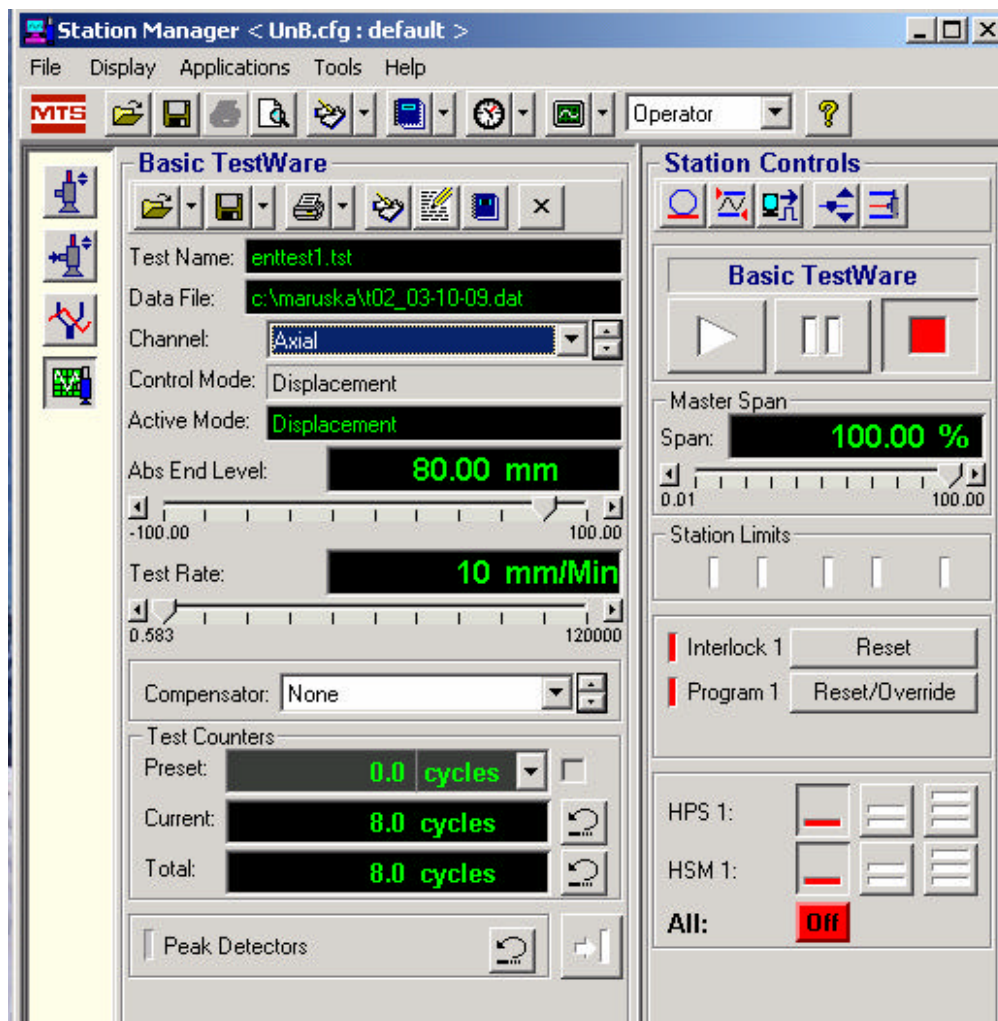


Figura 02-Primeira tela do programa computacional para serem iniciados os procedimentos de ensaio.

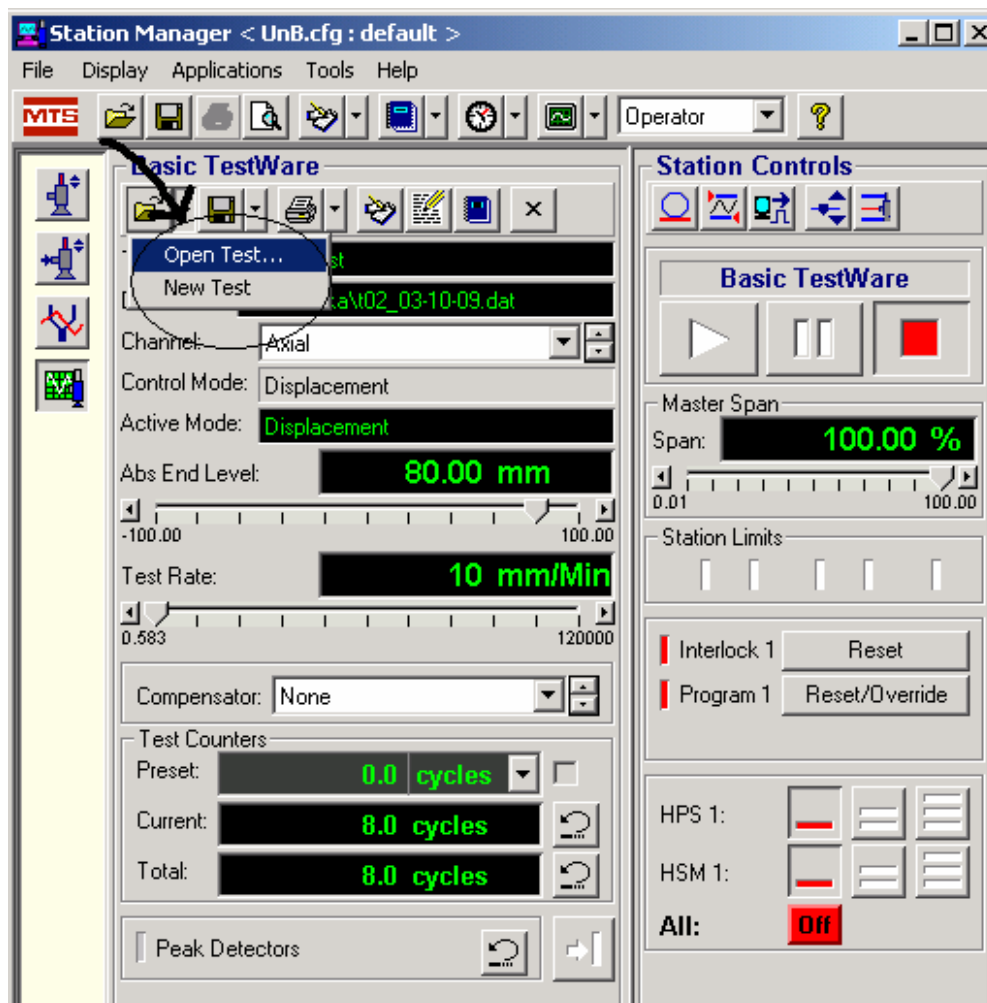


Figura 03-Abertura do programa para o início do ensaio.

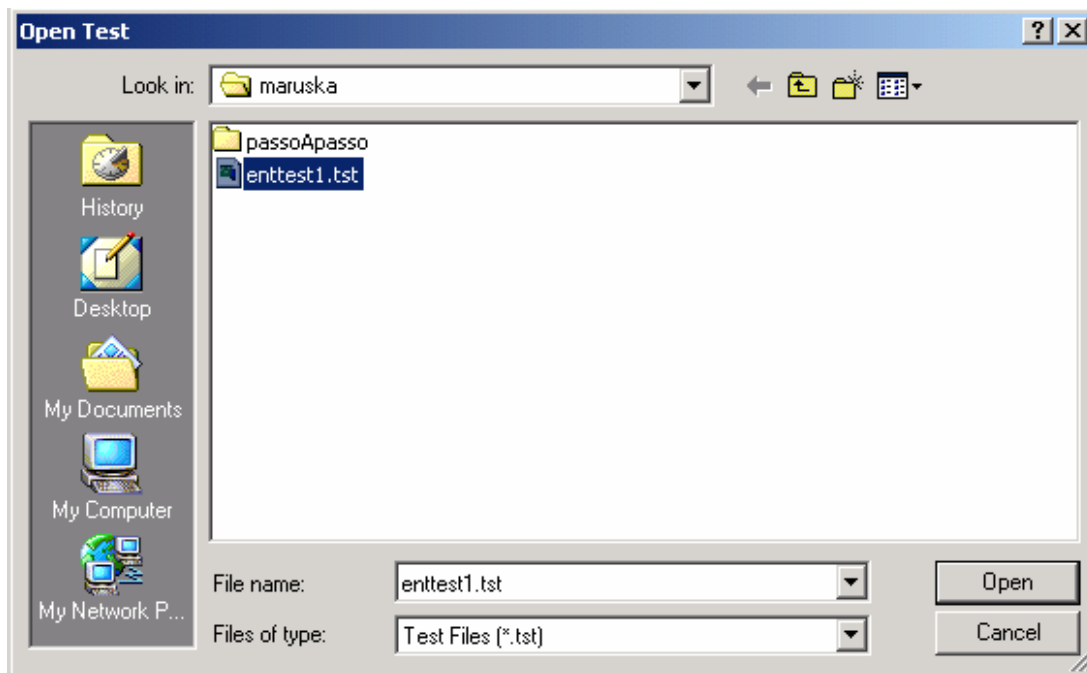


Figura 04- Abertura do arquivo dentro da pasta de trabalho.

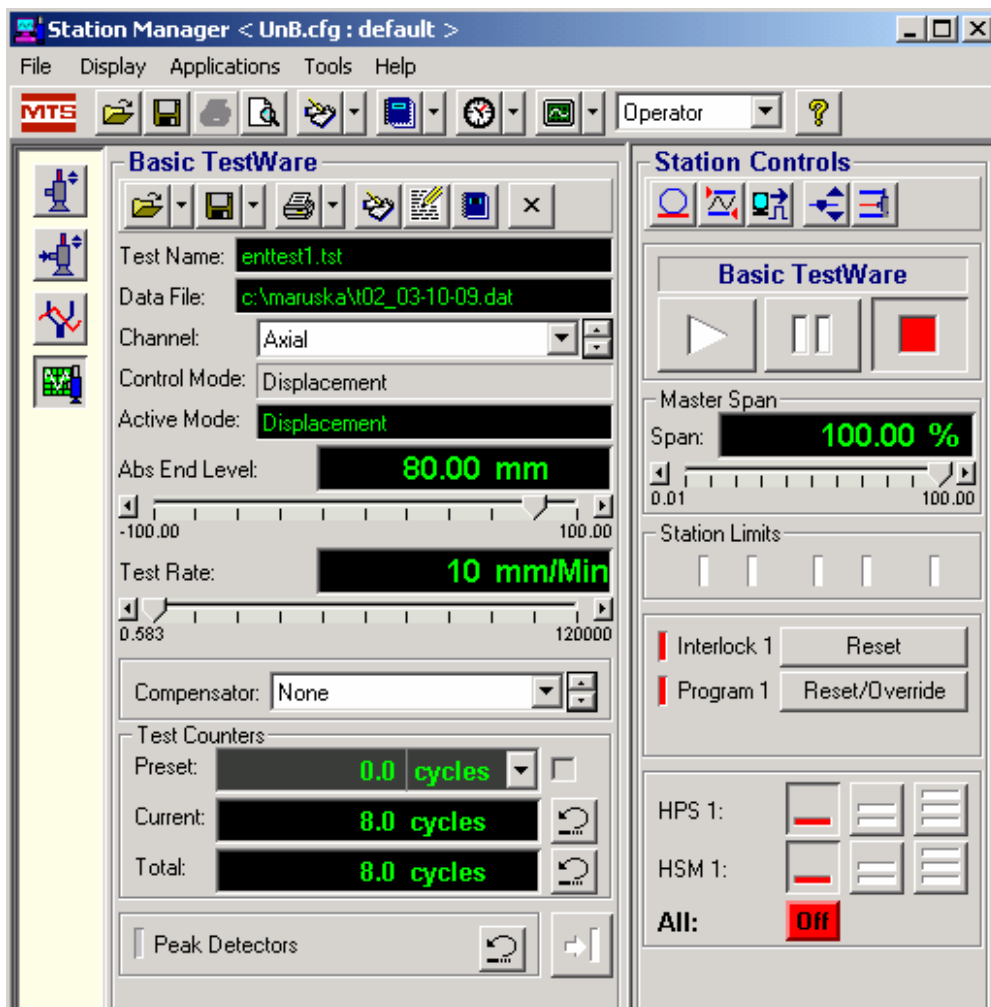


Figura 05-Parâmetros necessários para o ensaio (velocidade e deslocamento máximo).

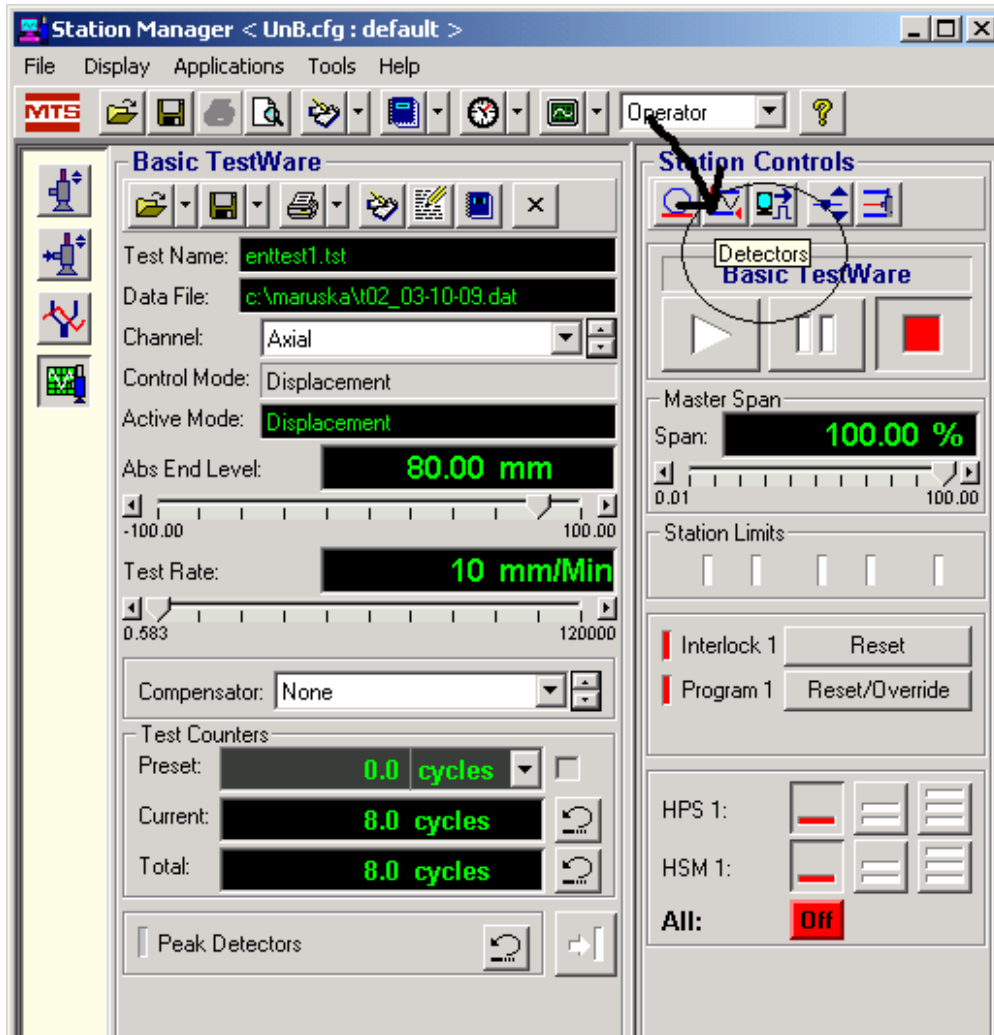


Figura 06-Tela ilustrativa com a verificação dos detectores (Força, deslocamento ou tensão).

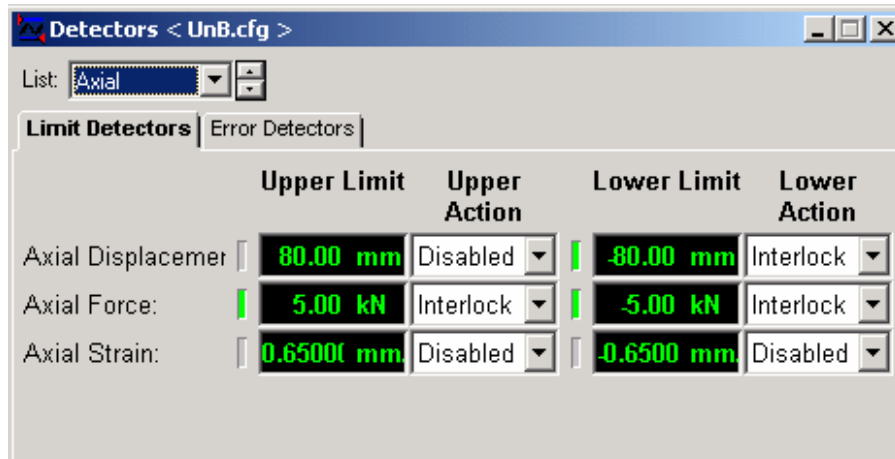


Figura 07-Detectores (Foram habilitados os detectores de força e deslocamento).

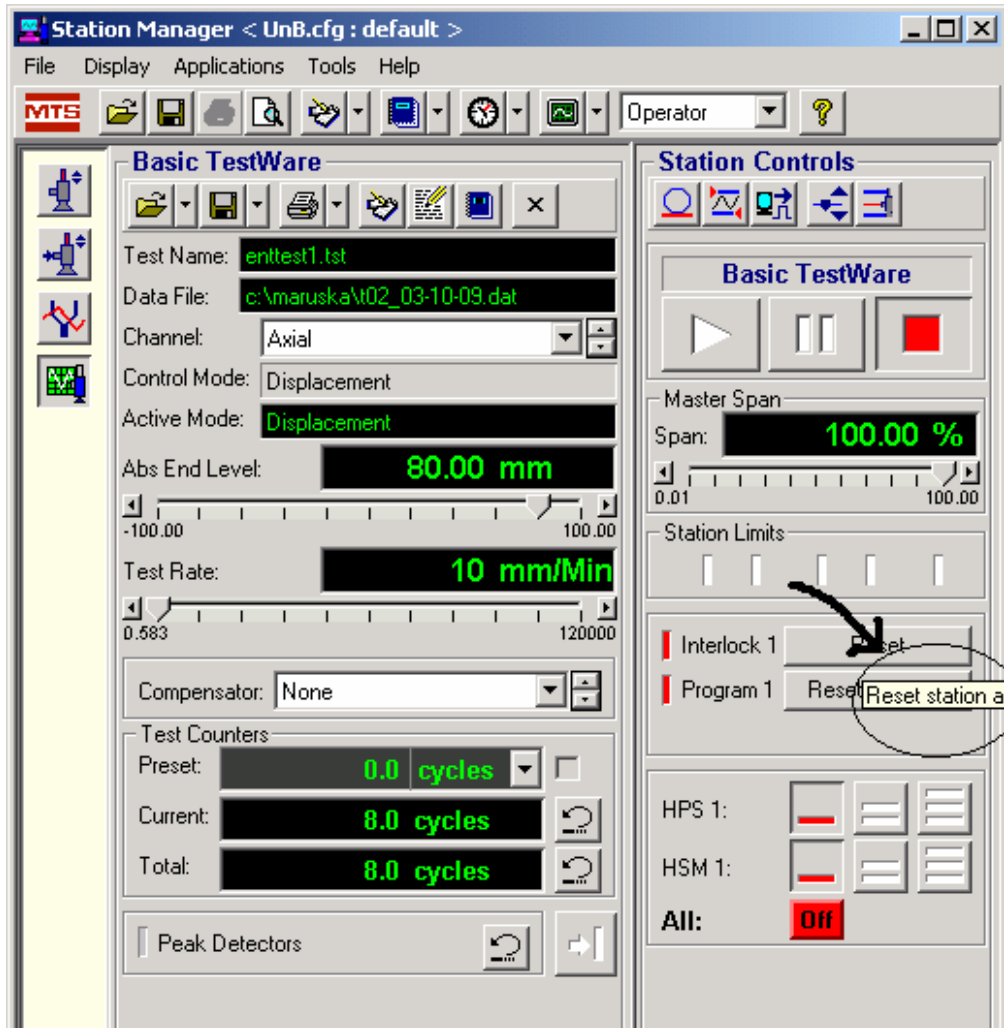


Figura 08-Tela onde os novos parâmetros do ensaio são assimilados pelo programa.

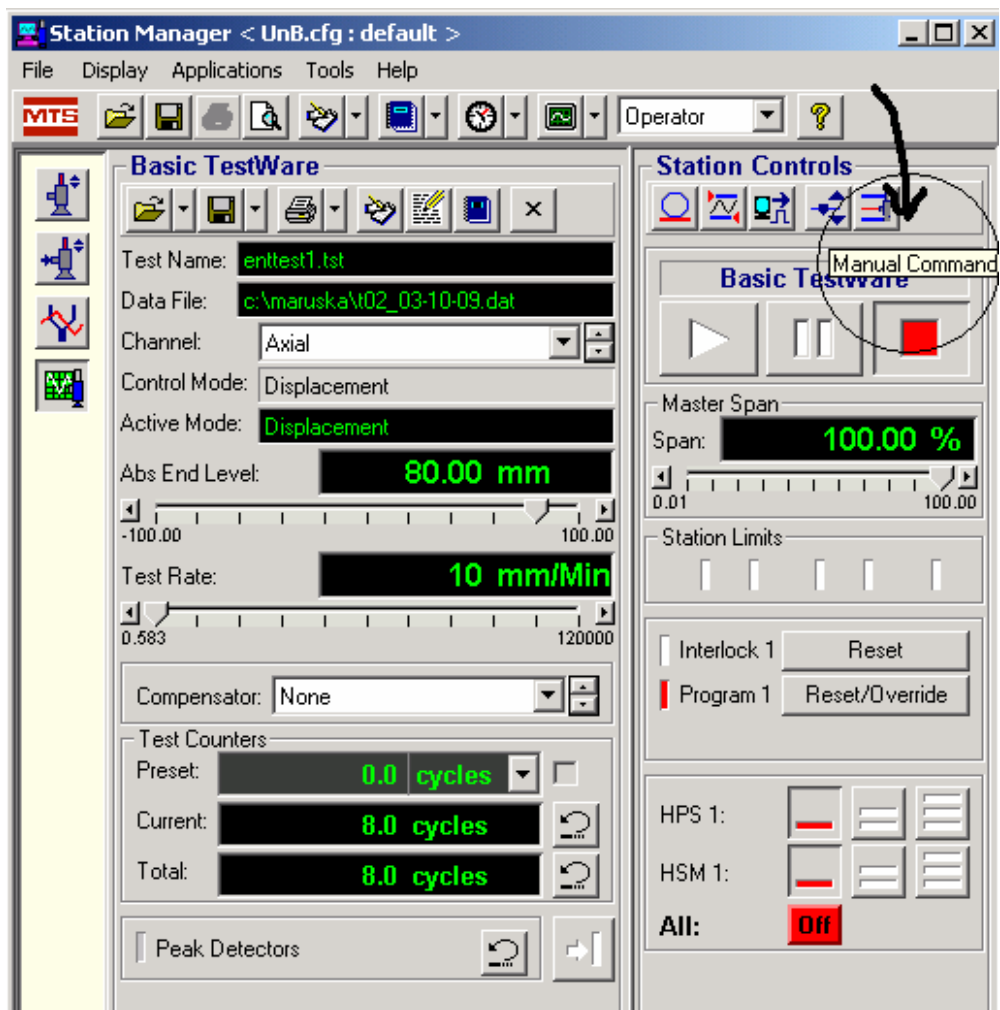


Figura 09-Tela com a indicação do acionamento para o controle manual na prensa (Colocação da amostra).

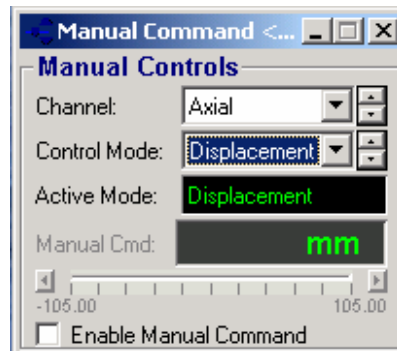


Figura 10-Tela que controla a força e o deslocamento no ensaio (Desativado o controle manual, após a colocação da amostra).

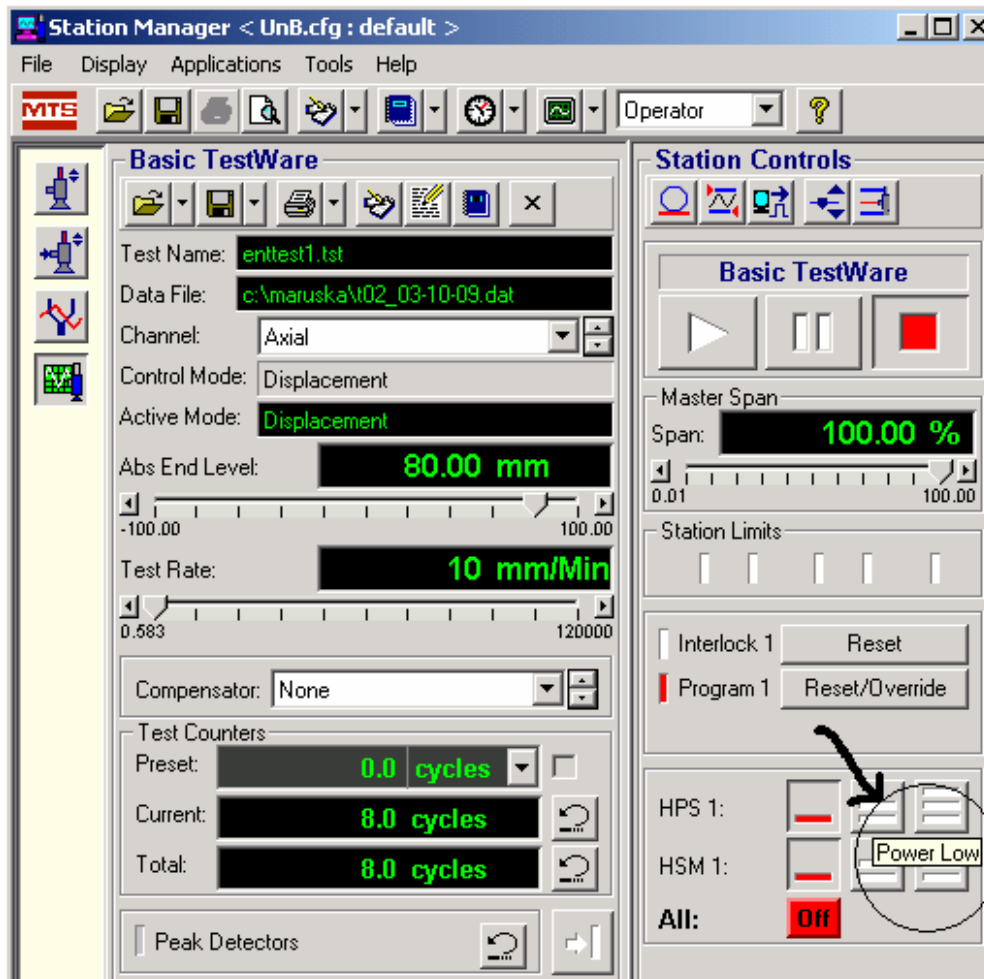


Figura 11-Tela com os procedimentos de partida para serem acionadas as bombas que controlam o fluido responsável pelo funcionamento da prensa.

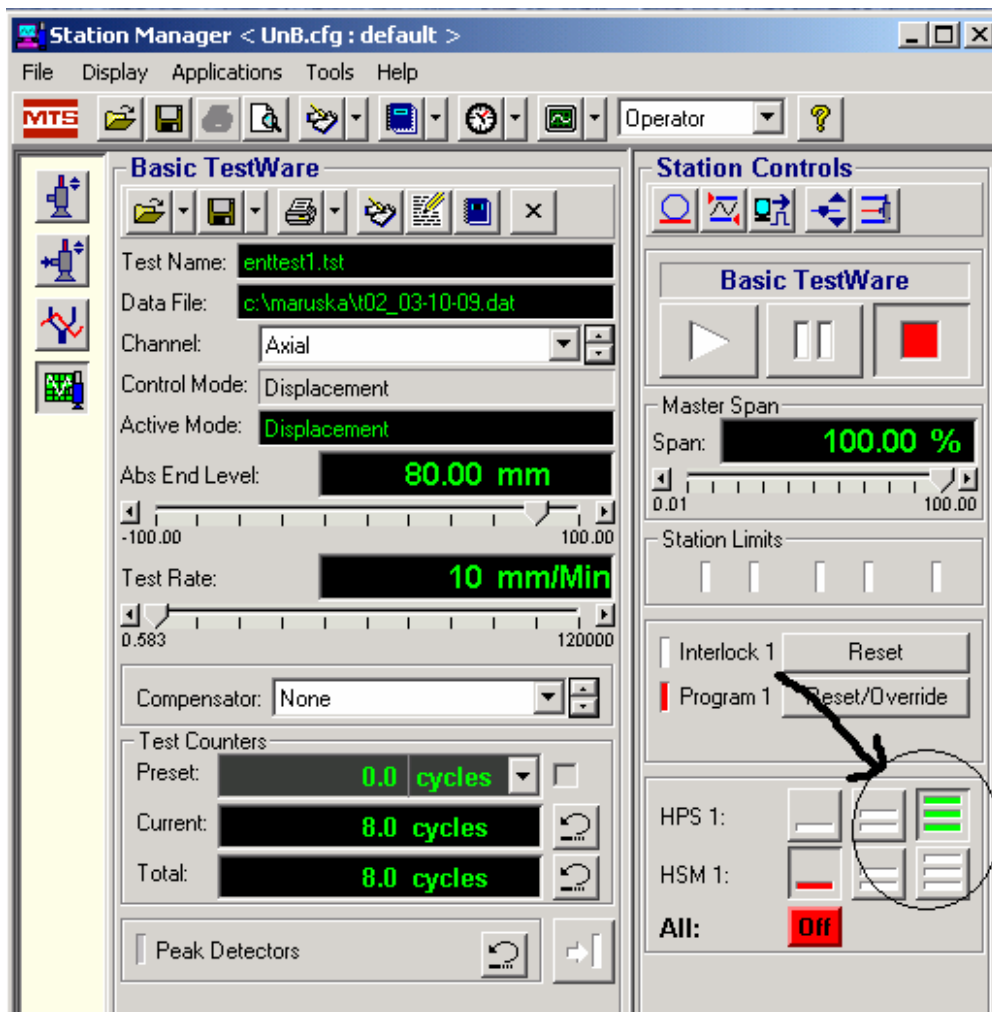


Figura 12-Tela com os procedimentos de partida para o acionamento da primeira bomba (HPS1).

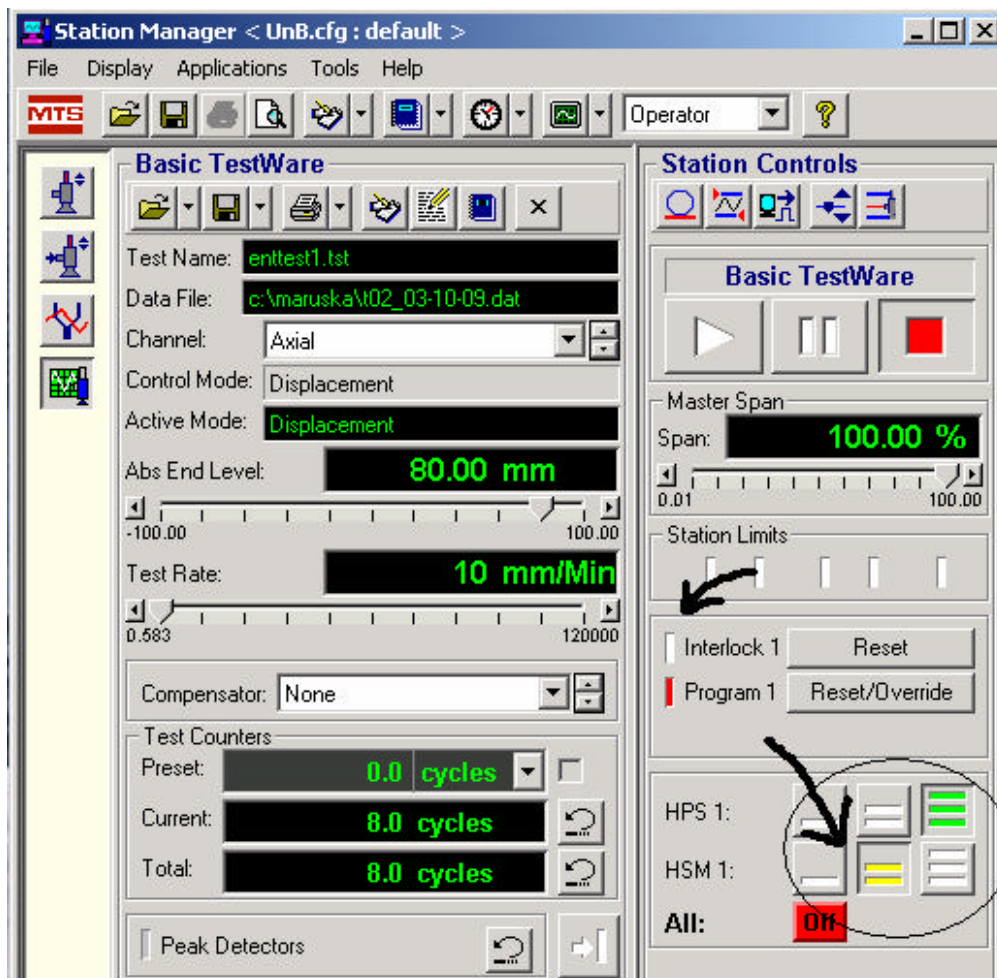


Figura 13-Tela com os procedimentos de partida para o acionamento da segunda bomba (HSM 1).

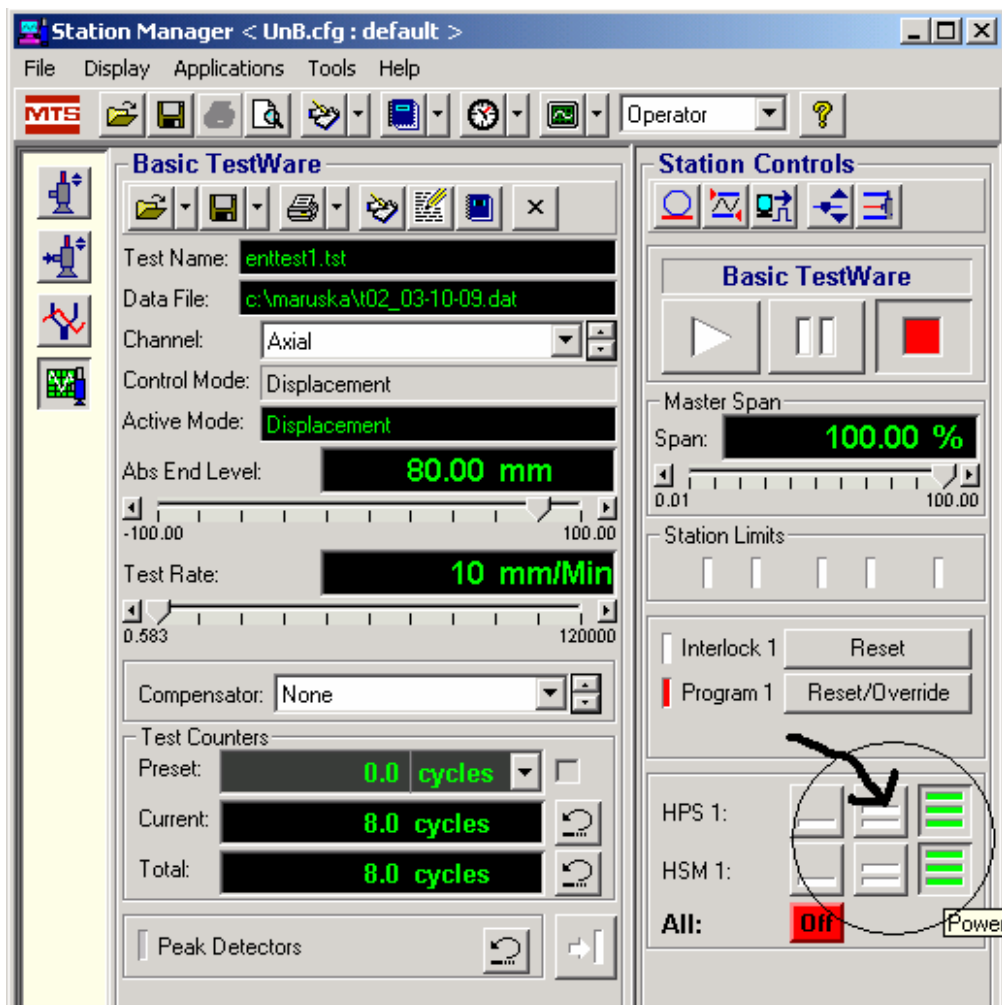
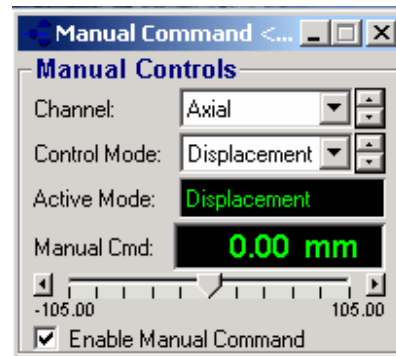


Figura 14-Tela com o acionamento das duas bombas (HPS 1 e HSM 1).



(a)



(b)

Figura 15- Telas onde a força e o deslocamento foram zerados antes do ensaio.

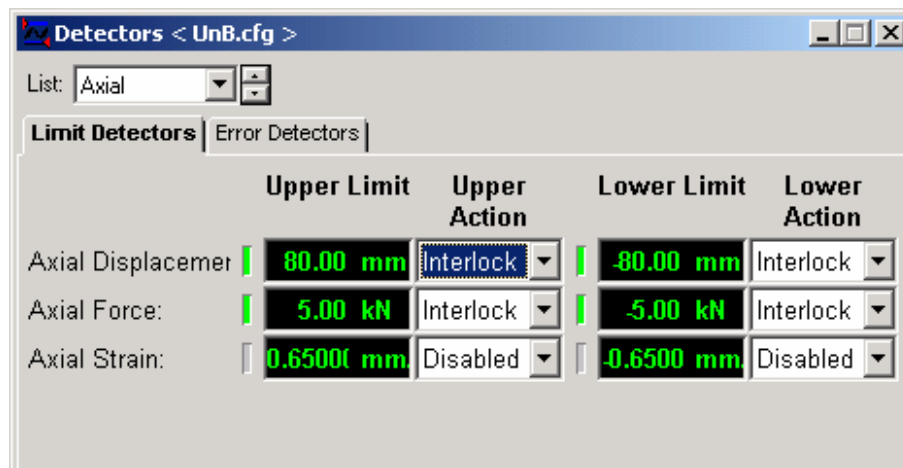


Figura 16- Telas onde a força e o deslocamento foram acionados.

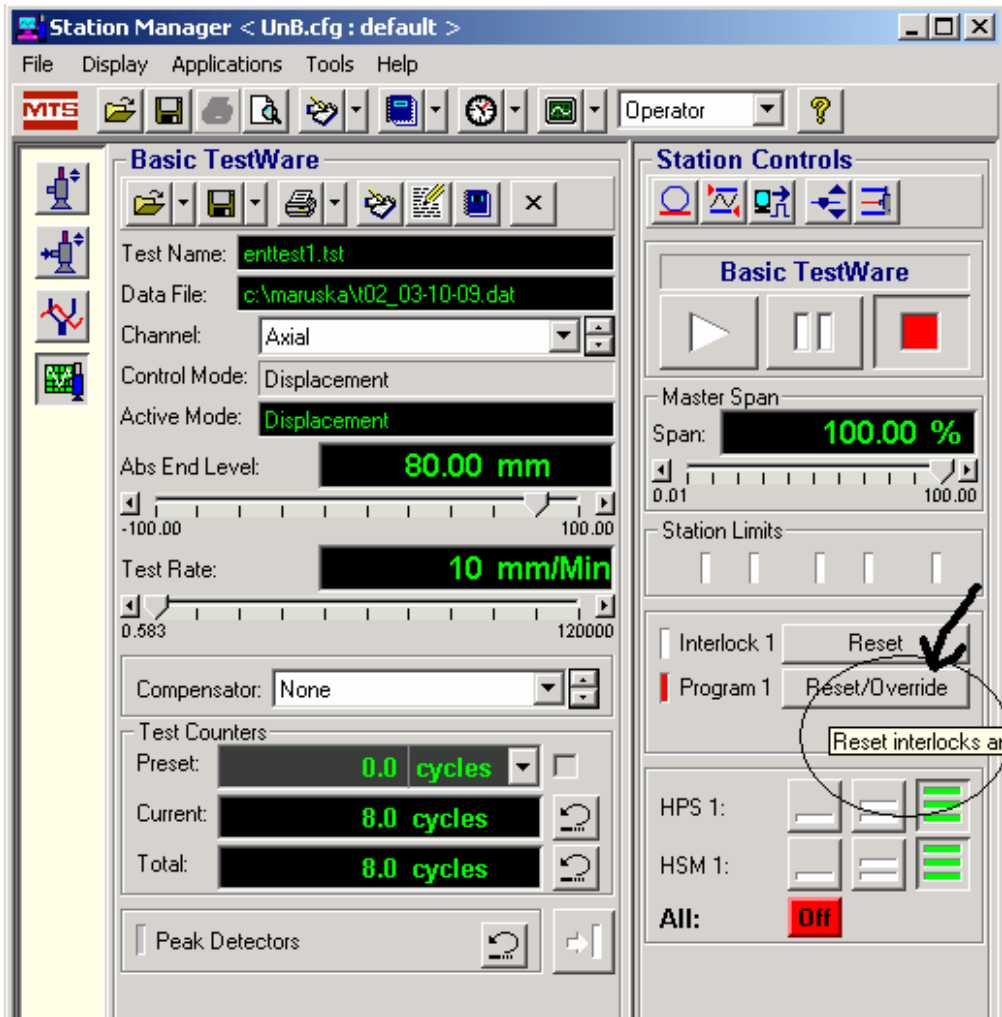


Figura 17- Tela ilustrativa com o “Reset” para o início do ensaio.

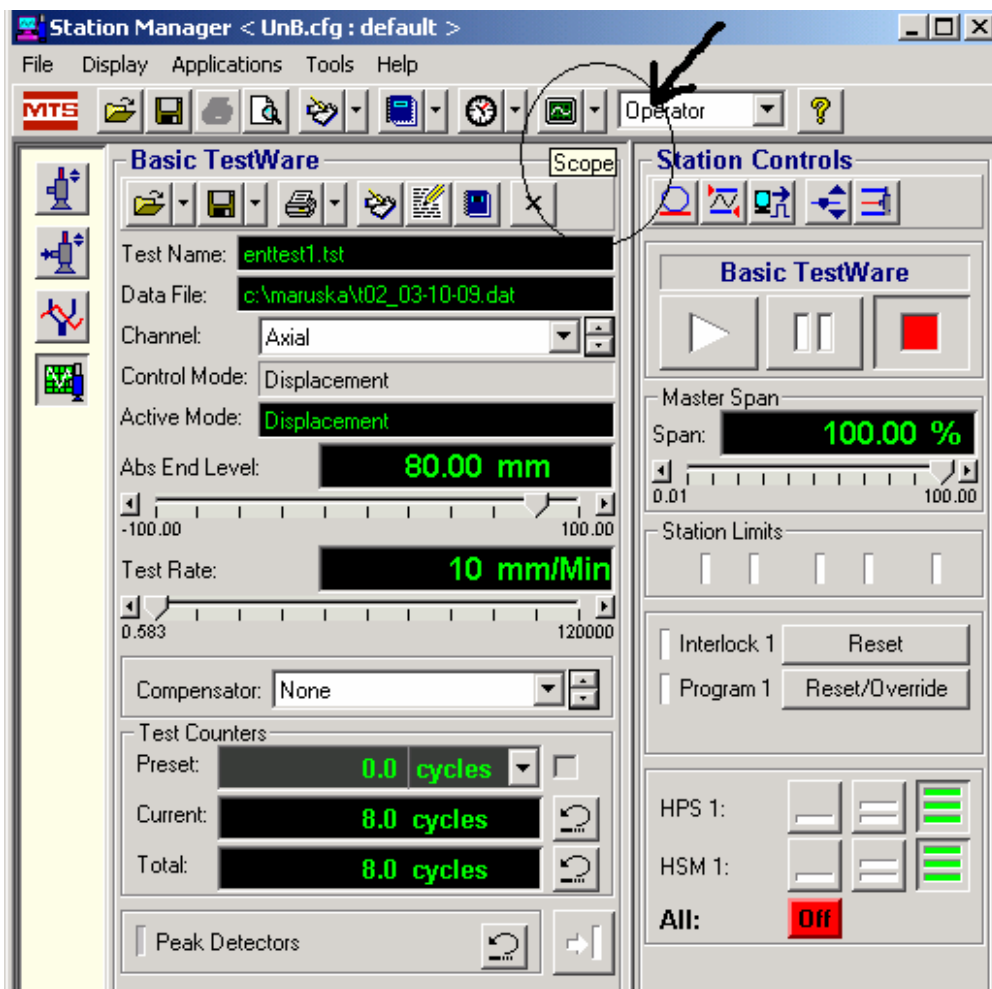


Figura 18- Abertura do gráfico para o acompanhamento do ensaio.

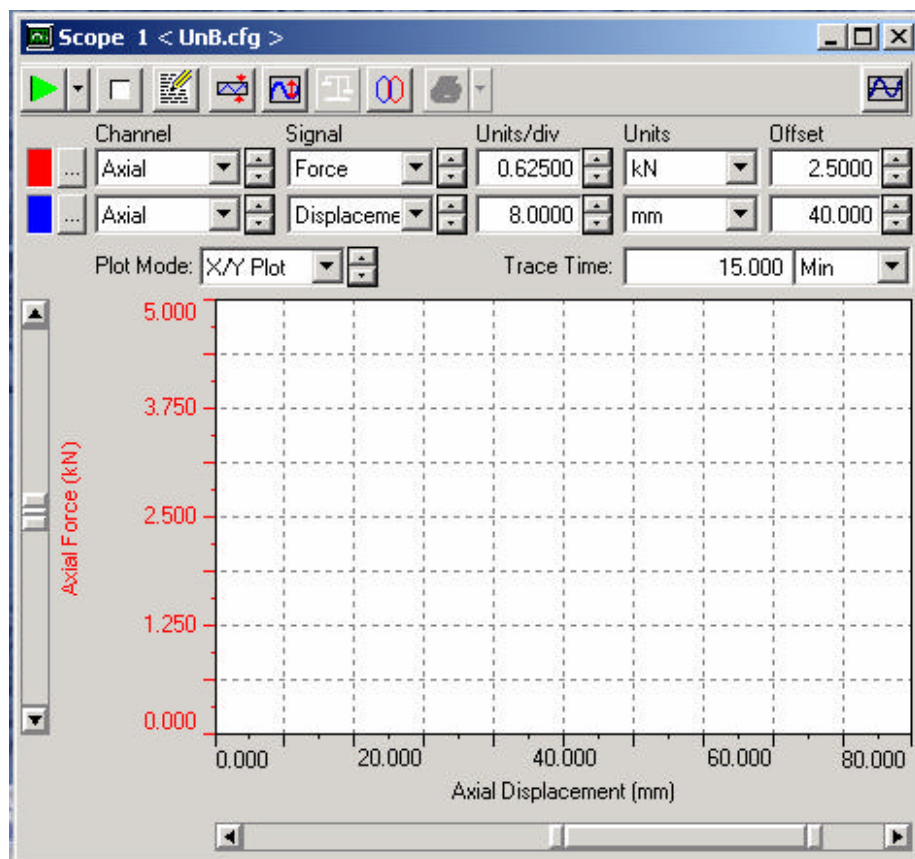


Figura 19- Tela ilustrativa onde os parâmetros do gráfico foram alterados.

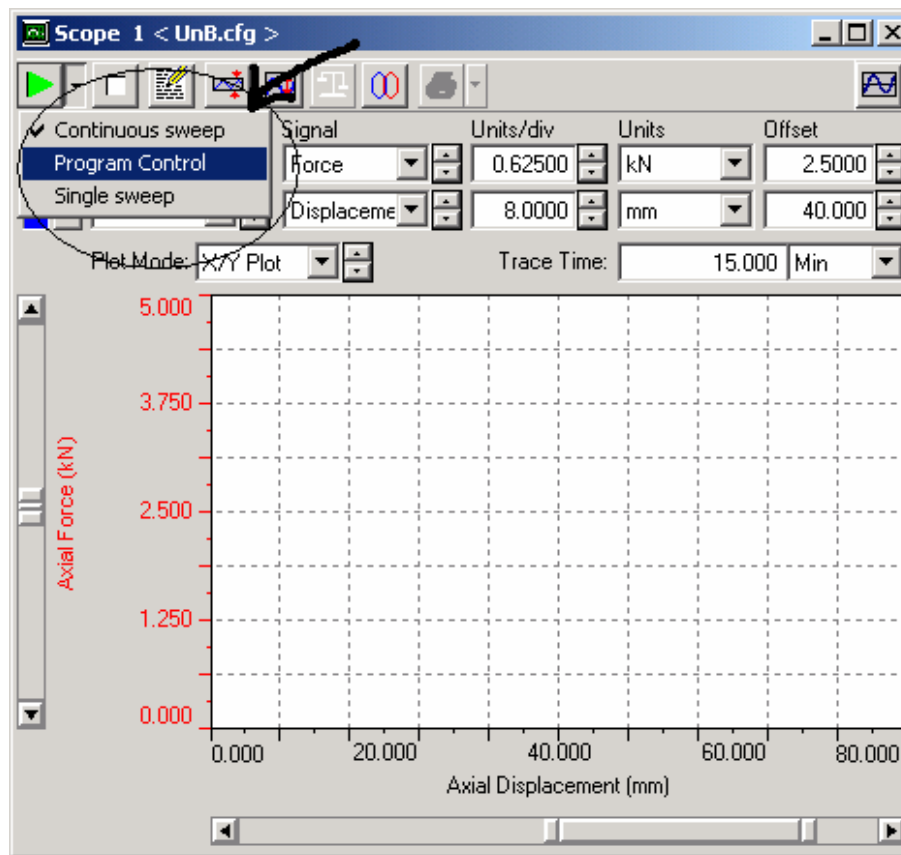


Figura 20- Tela ilustrativa onde foi acionado o controle do ensaio pelo programa.

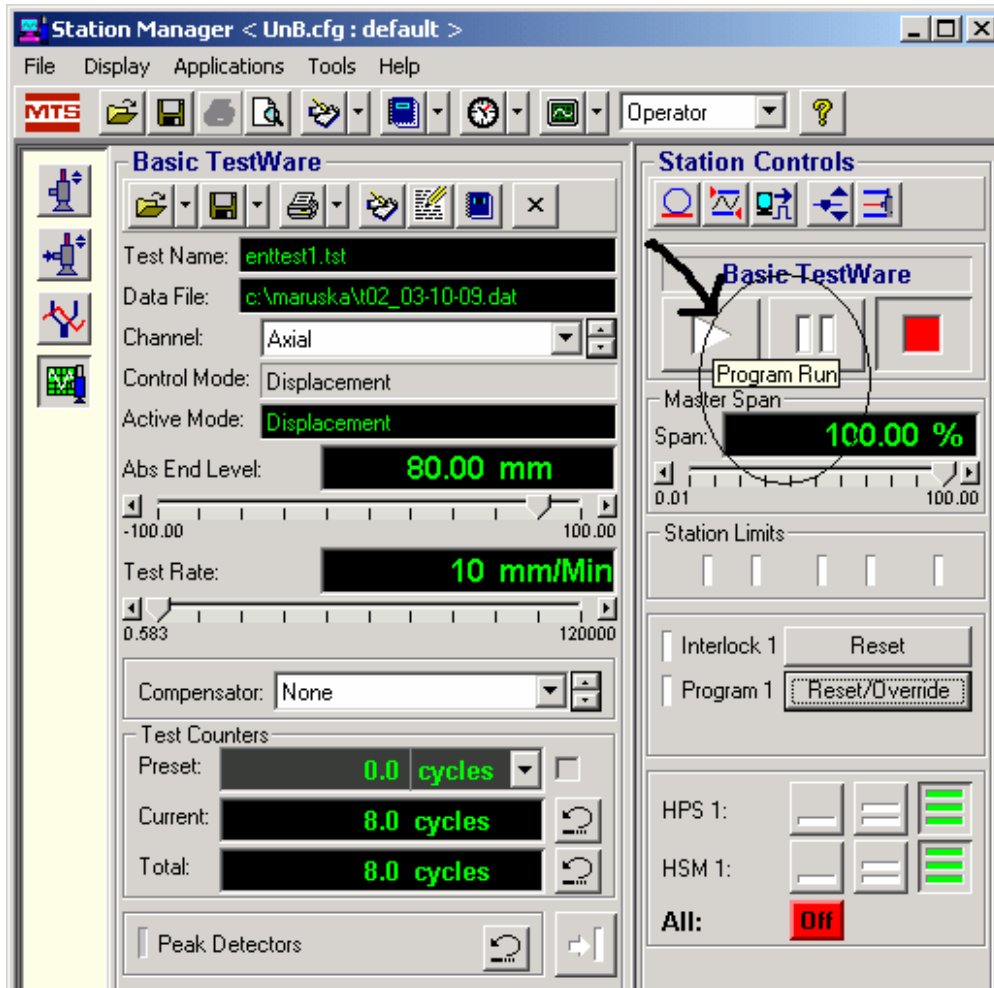


Figura 21- Início do ensaio.

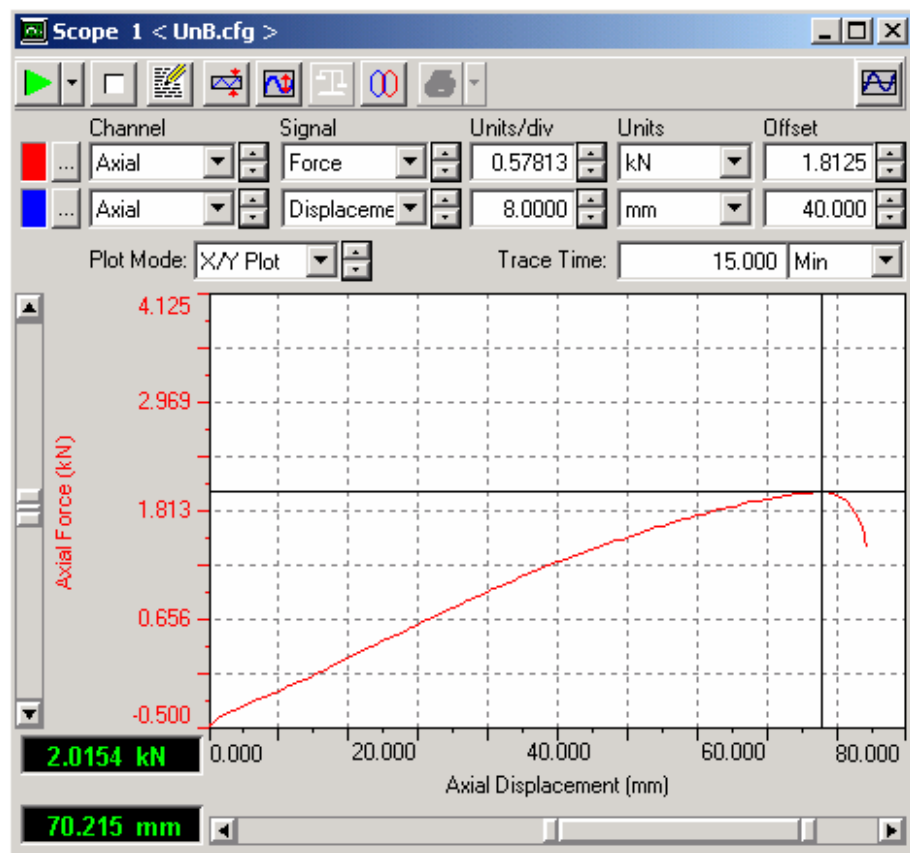


Figura 22- Gráfico de um ensaio dentro do programa.

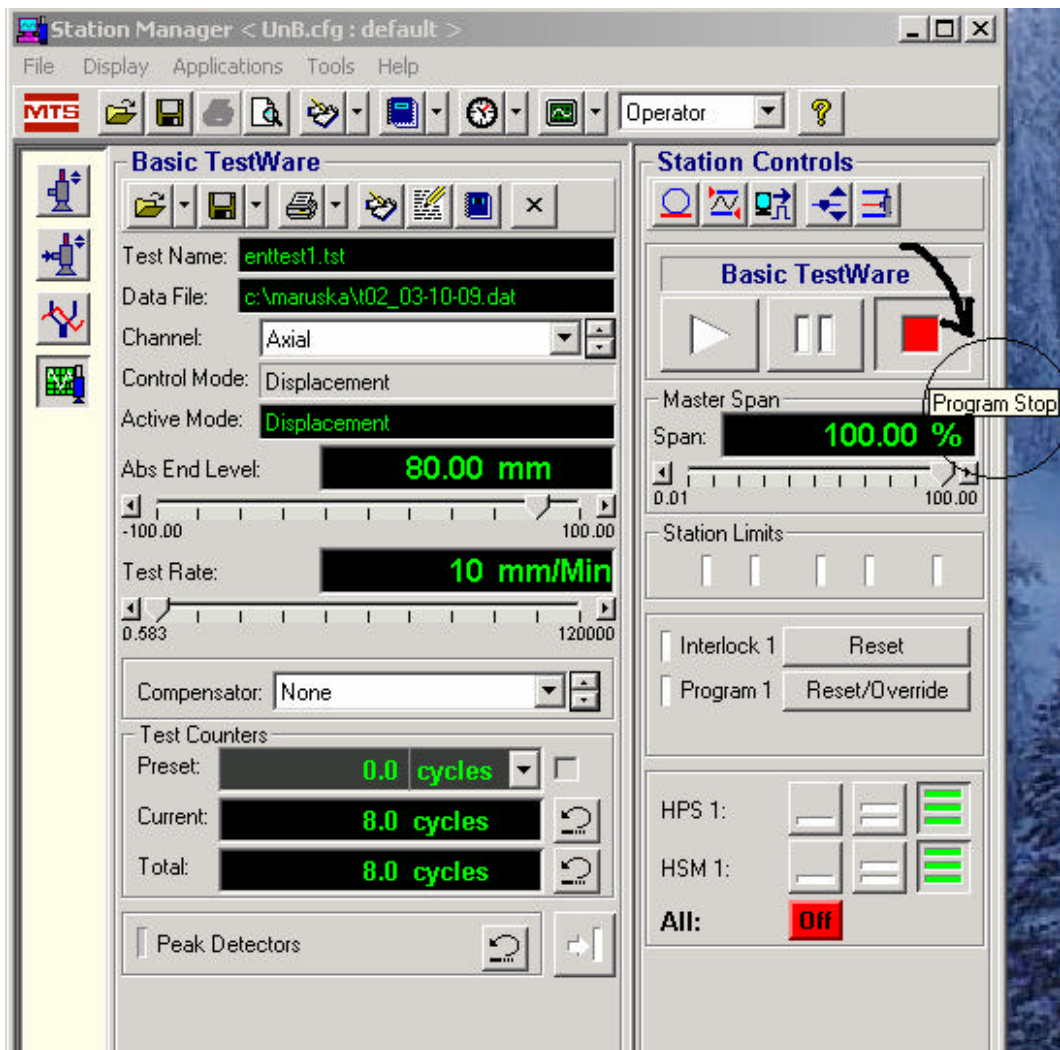


Figura 23-Final do ensaio.

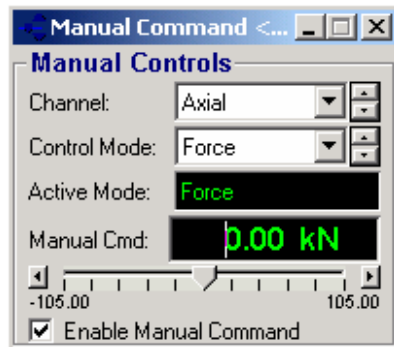


Figura 24-Tela ilustrativa onde a força foi zerada e o controle manual foi habilitado para a retirada da amostra.