

COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO E DE DURABILIDADE  
DE FORMAS TÊXTEIS TUBULARES APLICADAS EM  
OBRAS HIDRÁULICAS

**JOSÉ LUIZ ERNANDES DIAS FILHO**

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF**

Campos dos Goytacazes, 21 de setembro 2016

**COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO E DE DURABILIDADE  
DE FORMAS TÊXTEIS TUBULARES APLICADAS EM  
OBRAS HIDRÁULICAS**

**JOSÉ LUIZ ERNANDES DIAS FILHO**

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Paulo César de Almeida Maia  
Coorientador: Gustavo de Castro Xavier

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF**

Campos dos Goytacazes, 21 de setembro 2016

# COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO E DE DURABILIDADE DE FORMAS TÊXTEIS TUBULARES APLICADAS EM OBRAS HIDRÁULICAS

**JOSÉ LUIZ ERNANDES DIAS FILHO**

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovado em 21 de setembro de 2016.

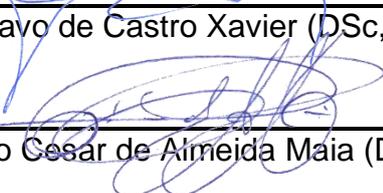
Comissão Examinadora:

  
Prof.<sup>a</sup> Maria de Lurdes da Costa Lopes (PhD, Geotecnia) – FEUP

  
Prof. Gregório Luis Silva Araújo (DSc, Geotecnia) – UnB

  
Prof. Rodrigo Martins Reis (DSc, Geotecnia) – UENF

  
Prof. Gustavo de Castro Xavier (DSc, Geotecnia) – UENF (Coorientador)

  
Prof. Paulo Cesar de Almeida Maia (DSc, Geotecnia) – UENF (Orientador)

*“Cada qual acredita que o que tem a dizer é muito mais importante do que o outro  
tenha a contribuir.”  
(Albus Percival Wulfric Brian Dumbledore)*

A Deus

v

## **AGRADECIMENTOS**

À UENF e à CAPES pelo apoio financeiro. À HUESKER pelo fornecimento das amostras, apoio financeiro e particularmente ao Engenheiro André Estevão. Ao LECIV, LCQUI e LAMAV pela disponibilidade dos laboratórios e pessoal técnico. Aos professores Paulo César de Almeida Maia e Gustavo de Castro Xavier pela atenção, paciência e dedicação como orientadores e amigos. À antiga família LED e ao futuro GeoLED que vem crescendo em harmonia e conceito. Aos bolsistas de apoio ao ensino, iniciação científica e colegas da UENF, em especial aos Uenfianos Serginho, Priscila, Fábio, Caroline, Rayssa e Weverton, aos Ledianos, Neiva, Marta, Brunner, Tiago, Taís, Anna, Fábio, Guilherme, Vitor e Talita, e aos bolsistas da Escola Técnica João Barcelos, Cristiano, Gisele, Whelington, Allan, Rafael, Jedir e Deyson. A todos os funcionários do LECIV e da Oficina, em especial à Olívia, Nadson, Derval, Milton, Vanúzia, Michel e Marcelo. Aos meus pais, irmão e avós pelo apoio dado em todas as fases deste trabalho. Aos familiares que sempre estavam ativos a prestarem assistência as atividades durante o doutorado. A Deus que sempre esteve ao meu lado e me deu forças em todos os momentos difíceis.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação do comportamento geomecânico e de durabilidade de formas têxteis tubulares – FTT. As FTT são estruturas utilizadas em obras hidráulicas para proteção costeira e ribeirinhas. São constituídas normalmente por geotêxteis tecidos e costurados, transversalmente e longitudinalmente, com formato de um tubo.

São considerados quatro geotêxteis tecidos constituintes do FTT: dois laminetes de polipropileno e dois multifilamentos de poliéster.

É proposta uma metodologia de estudo onde é feita a avaliação das variações do comportamento mecânico devido aos processos de degradação do material, naturalmente no campo ou de forma acelerada no laboratório. Os procedimentos de degradação acelerada no laboratório são por condensação e radiação ultravioleta e ciclos de saturação de secagem. A avaliação do comportamento mecânico é feita através dos ensaios de tração e punção direta ou com fluência. Fez-se ainda a caracterização das propriedades físicas e hidráulicas. Propõe-se um procedimento especial de laboratório onde o processo de degradação acelerada ocorre de forma simultânea à solicitação mecânica. Nesse caso faz-se a degradação por ciclos de saturação e secagem simultaneamente à tração ou punção dos geotêxteis.

Dos resultados nota-se que, de acordo com os materiais estudados, os polipropilenos foram menos susceptíveis a degradação em relação aos poliésteres, com perda de resistência variando entre 48 e 55% e, 73 e 98%, respectivamente. Por fim, trabalhou-se com a avaliação a sinergia entre ensaios de degradação, fluência e confinamento, a fim de se avaliar a durabilidade dos geotêxteis tecidos.

Pôde-se concluir que a metodologia para análise da durabilidade mostrou ser uma ferramenta importante para previsão do comportamento a longo prazo desses materiais. Os procedimentos utilizados de fluência, degradação no campo e no laboratório, degradação acelerada simultânea à solicitação mecânica e sinergia apresentaram resultados de durabilidade similares e indicaram que, dos materiais estudados, os polipropilenos como a melhor escolha como FTT.

**Palavras-Chave:** Geotêxtil tecido, fluência, durabilidade, ensaios de degradação, formas têxteis tubulares.

## ABSTRACT

This work presents an evaluation of the geomechanical and durability behavior of geotube - FTT. FTT are structures used in hydraulic design for coastal and riverine protection. They are usually constituted of woven geotextiles and sewn, transversely and longitudinally, shaped like a tube.

Four woven geotextiles are considered constituent of FTT: two polypropylene monofilaments and two polyester multifilaments.

A methodology is proposed where it is the evaluation of the variations of the mechanical behavior due to degradation processes of the material, naturally in the field or accelerated in the laboratory. Accelerated degradation procedures in the laboratory are by condensation and ultraviolet radiation and drying moistening cycles. The evaluation of the mechanical behavior is done through the tensile and static puncture strength testing or with creep. The physical and hydraulic properties were also characterized. A special laboratory procedure is proposed where the accelerated degradation process occurs simultaneously with the mechanical request. In this case the degradation is done by wetting and drying cycles simultaneously to the tensile and static puncture testing of the woven geotextiles.

From the results noted that, according to the materials studied, the polypropylenes are less susceptible to degradation compared to polyesters with resistance loss varying between 48 and 55%, and 73 and 98%, respectively. Finally, we worked on a synergy evaluation between degradation, creep and confinement tests, in order to evaluate the durability of woven geotextiles.

It was concluded that the methodology for durability analysis proved to be an important tool for predicting the long-term behavior of these materials. The procedures used for creep, field and laboratory degradation, accelerated degradation simultaneously with the mechanical stress and synergy presented similar durability results and indicated that of the studied materials, polypropylenes as the best choice as FTTs.

**Keywords:** Woven geotextile, creep, durability, degradation tests, geotube.

# ÍNDICE

Agradecimentos .....	vi
Resumo .....	vii
Abstract .....	viii
Índice .....	ix
Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xviii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos .....	xxi
1. Introdução .....	24
1.1 Considerações Iniciais .....	24
1.2 Objetivos da Tese .....	24
1.3 Escopo da Tese .....	25
2. Estado da Arte .....	26
2.1 Considerações Iniciais .....	26
2.2 Literatura Técnica .....	26
2.3 Formas Têxteis Tubulares - FTT .....	28
2.3.1 Definição .....	28
2.3.2 Breve Histórico .....	29
2.3.3 Características Gerais .....	31
2.3.4 Comportamento Geomecânico .....	34
2.3.5 Aspectos do Projeto de Dimensionamento .....	38
2.3.6 Fatores de Segurança - FS .....	40
2.4 Geossintéticos .....	42
2.4.1 Materiais Constituintes .....	43
2.4.2 Classificação dos Geossintéticos .....	44
2.4.3 Ensaio de Caracterização .....	45
2.5 Durabilidade dos Geossintéticos .....	64
2.5.1 Conceitos Fundamentais .....	66
2.5.2 Degradação em Geossintéticos .....	66
2.5.3 Metodologias para Avaliação da Durabilidade .....	68
2.5.4 Procedimentos Experimentais para Avaliação da Degradação .....	73
2.6 Considerações Finais .....	88
3. Programa Experimental .....	89
3.1 Considerações Iniciais .....	89
3.2 Material de Estudo .....	90
3.3 Equipamentos .....	90
3.3.1 Fabricação e Montagem .....	91
3.3.2 Outros Equipamentos .....	102
3.4 Metodologia de Ensaio .....	107
3.4.1 Ensaio de Caracterização Física .....	108

3.4.2	Ensaio de Caracterização Mecânica .....	108
3.4.3	Ensaio de Caracterização Hidráulica .....	114
3.4.4	Ensaio de Caracterização do Desempenho.....	115
3.4.5	Ensaio de Caracterização da Durabilidade.....	118
3.4.6	Parâmetros do Ensaio de Caracterização da Durabilidade .....	119
3.5	Considerações Finais .....	122
4.	Resultados .....	123
4.1	Considerações Iniciais.....	123
4.2	Ensaio de Caracterização.....	123
4.3	Considerações Finais .....	142
5.	Análises e Discussões .....	144
5.1	Considerações Iniciais.....	144
5.2	Ensaio de Caracterização.....	144
5.3	Sinergia entre ensaios de fluência, desempenho e durabilidade.....	186
5.4	Considerações Finais .....	189
6.	Conclusões .....	191
6.1	Conclusões Gerais .....	191
6.2	Conclusões Específicas.....	192
6.2.1	Quanto à Degradação das Amostras.....	192
6.2.2	Quanto à Caracterização.....	192
6.2.3	Quanto ao Equipamento.....	196
6.2.4	Quanto aos Ensaio de Durabilidade .....	197
6.2.5	Quanto ao Parâmetro de Durabilidade .....	198
6.2.6	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	198
	Referências .....	199
	Anexo A - Microscopias.....	233

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquemático das FTT e suas características básicas .....	28
Figura 2.2. Barreira contra tempestade da Holanda .....	29
Figura 2.3. Obras com FTT pelo mundo.....	30
Figura 2.4. Tipos de costura de FTT .....	32
Figura 2.5. FTT vazio e preenchido.....	34
Figura 2.6. Esquemático de esforços que mostra o geotêxtil sendo tracionado .....	34
Figura 2.7. Esquemático de esforços mostra o puncionamento no geotêxtil por pedregulho .....	35
Figura 2.8. Esquemático caracterizando a fluência no geotêxtil com o tempo.....	36
Figura 2.9. Comportamento global de FTT.....	36
Figura 2.10. Ilustrações dos mecanismos de falha de FTT .....	37
Figura 2.11. Geometria da FTT e as tensões geradas pelo preenchimento .....	39
Figura 2.12. Esquemático de forças na FTT .....	40
Figura 2.13. Unidades de repetição dos principais polímeros em FTT .....	43
Figura 2.14. Parâmetros da curva do ensaio de resistência à tração .....	49
Figura 2.15. Parâmetros da curva do ensaio de puncionamento.....	53
Figura 2.16. Ensaio de tração indireta através do puncionamento por diferentes técnicas.....	56
Figura 2.17. Curvas típicas obtidas dos ensaios de fluência .....	58
Figura 2.18. Maior ensaio de fluência realizado em geossintético.....	59
Figura 2.19. Ocorrências gerais de problemas em FTT .....	65
Figura 2.20. Caracterização da variação das propriedades do geossintéticos com o tempo considerando a influência do grau de alterabilidade na durabilidade dos materiais .....	66
Figura 2.21. Mecanismos de degradação em geossintéticos .....	68
Figura 2.22: Comportamento das propriedades do geossintético durante etapas de um projeto.....	69
Figura 2.23: Metodologia para avaliação da alterabilidade em geossintéticos .....	72
Figura 2.24: Procedimentos e ensaios para caracterização dos materiais .....	76
Figura 2.25. Maior ensaio de fluência realizado em geossintético.....	77
Figura 2.26. Esquemático e equipamento de termo oxidação .....	79

Figura 2.27. Espectros de luz natural e artificial de UVA, UVB e arco de xenon. ....	81
Figura 2.28. Esquemático e equipamento de condensação e radiação ultravioleta..	81
Figura 2.29. Esquemático e equipamento de exposição à líquidos .....	82
Figura 2.30. Esquemático e equipamento de degradação universal da UENF.....	84
Figura 2.31. Esquemático e equipamento de ciclagem de temperaturas altas e baixas .....	85
Figura 2.32. Esquemático e equipamento automático de saturação e secagem da UENF.....	86
Figura 2.33. Esquemático e equipamento de exposição à névoa salina .....	87
Figura 3.1. Programa experimental .....	89
Figura 3.2. Geotêxteis tecidos utilizados na tese .....	90
Figura 3.3. Fases de fabricação e montagem dos equipamentos da tese .....	91
Figura 3.4. Alavancas dos ensaios de fluência.....	92
Figura 3.5. Curva de calibração para determinação dos pesos nas alavancas de cada ensaio .....	93
Figura 3.6. Pesos confeccionados com tubos de PVC com preenchimento em barras de ferro .....	94
Figura 3.7. Sistema de fluência convencional com aplicação de carga por alavanca .....	95
Figura 3.8. Garras do sistema de fluência convencional com aplicação de carga por alavanca .....	96
Figura 3.9. Resumo das etapas de execução do pórtico.....	97
Figura 3.10. Visão geral e com detalhes do sistema de aquisição de dados.....	98
Figura 3.11. Esquemático do sistema de aquisição de dados .....	98
Figura 3.12. Suporte dos braços de alavanca utilizados nos ensaios de fluência no pórtico .....	99
Figura 3.13. Garras do sistema de fluência acelerada .....	99
Figura 3.14. Sistema de Saturação e Secagem .....	101
Figura 3.15. Calibração da Câmara de Saturação e Secagem.....	101
Figura 3.16. Equipamentos utilizados .....	104
Figura 3.17. Garras utilizadas na tese.....	105
Figura 3.18. Esquemático e equipamento de permeabilidade .....	106
Figura 3.19. Esquemático e equipamento de permeabilidade abertura de filtração	107

Figura 3.20. Procedimento de validação do método de Kirchhoff com uso de pregos .....	112
Figura 3.21. Curva normalizada do ensaio de validação do Método de Kichhoff com pregos.....	112
Figura 3.22. Intervalo granulométrico do solo usado no ensaio.....	115
Figura 3.23. Granulometria da areia do mar.....	117
Figura 3.24. Granulometria da areia do rio.....	117
Figura 3.25. Campo experimental da UENF.....	119
Figura 3.26. Relação genérica entre o índice I do campo e do laboratório com o tempo .....	120
Figura 4.1. Microscopia dos Materiais Intactos em aproximações de 5, 20 e 50 vezes .....	124
Figura 4.2. Espectrofotometria de UV-Vis do PET340 degradado no campo .....	125
Figura 4.3. Espectrofotometria de UV-Vis do PET340 degradado no laboratório ...	125
Figura 4.4. Espectrofotometria de UV-Vis do PET740 degradado no campo .....	126
Figura 4.5. Espectrofotometria de UV-Vis do PET740 degradado no laboratório ...	126
Figura 4.6. Espectrofotometria de UV-Vis do PP500 degradado e intacto.....	127
Figura 4.7. Espectrofotometria de UV-Vis do PP925 degradado e intacto.....	127
Figura 4.8. Espectrofotometria de FTIR do PET340 degradado no campo .....	128
Figura 4.9. Espectrofotometria de FTIR do PET340 degradado no laboratório .....	128
Figura 4.10. Espectrofotometria de FTIR do PP500 degradado no campo.....	129
Figura 4.11. Espectrofotometria de FTIR do PP500 degradado no laboratório .....	129
Figura 4.12. Média dos ensaios de tração direta.....	130
Figura 4.13. Média dos ensaios de puncionamento .....	130
Figura 4.14. Ensaios de fluência por tração em 4 níveis de carga .....	131
Figura 4.15. Ensaios de fluência por puncionamento em 4 níveis de carga .....	132
Figura 4.16. Abertura de filtração do geotêxtil PET340 .....	133
Figura 4.17. Abertura de filtração do geotêxtil PP500 .....	134
Figura 4.18. Abertura de filtração do geotêxtil PET740 .....	134
Figura 4.19. Abertura de filtração do geotêxtil PP925 .....	135
Figura 4.20. Ensaios de puncionamento confinado.....	136
Figura 4.21. Resistência à tração com o tempo de exposição à degradação ultravioleta .....	137

Figura 4.22. Radiação solar acumulada diária (MJ/m <sup>2</sup> ) e temperatura média diária (°C)	138
Figura 4.23. Precipitação acumulada diária (mm) e umidade relativa do ar média diária (%)	138
Figura 4.24. Dados e imagens relativas à degradação no campo	139
Figura 4.25. Dados de radiação acumulada durante exposição em laboratório	140
Figura 4.26. Ensaio de fluência acelerada por tração em 4 níveis de carga	141
Figura 4.27. Ensaio de fluência acelerada por punção em 4 níveis de carga	142
Figura 5.1. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET340 Degradado no Campo	145
Figura 5.2. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET340 Degradado no Laboratório	145
Figura 5.3. Colmatação do PET340 por exposição à degradação natural no Campo	146
Figura 5.4. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP500 Degradado no Campo	146
Figura 5.5. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP500 Degradado no Laboratório	147
Figura 5.6. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET740 Degradado no Campo	147
Figura 5.7. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET740 Degradado no Laboratório	147
Figura 5.8. Colmatação do PET740 por exposição à degradação natural no Campo	148
Figura 5.9. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP925 Degradado no Campo	148
Figura 5.10. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP925 Degradado no Laboratório	148
Figura 5.11. Variação da absorção do espectro UV-Vis na amostra PET340	149
Figura 5.12. Variação da absorção do espectro UV-Vis na amostra PET740	150
Figura 5.13. Variação da coloração das amostras	150
Figura 5.14. FTIR das amostras PET340 e PP500	151
Figura 5.15. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PET340	152
Figura 5.16. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PP500	152

Figura 5.17. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PET740 .....	153
Figura 5.18. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PP925 .....	153
Figura 5.19. Detalhe das garras utilizadas nos ensaios de resistência à tração .....	155
Figura 5.20. Gráfico com os resultados dos ensaios de resistência à tração nas garras .....	155
Figura 5.21. Comportamento da tensão e deformação no ensaio de resistência à tração com variação da distância entre garras do PP500 .....	156
Figura 5.22. Média dos ensaios de puncionamento do PET340.....	157
Figura 5.23. Média dos ensaios de puncionamento do PP500.....	158
Figura 5.24. Média dos ensaios de puncionamento do PET740.....	158
Figura 5.25. Média dos ensaios de puncionamento do PP925.....	158
Figura 5.26. Média dos ensaios de puncionamento .....	159
Figura 5.27. Dados experimentais e modelos do geotêxtil PP500 em fluência convencional.....	162
Figura 5.28. Dados experimentais e modelos do geotêxtil PP500 em fluência no puncionamento .....	162
Figura 5.29. Ruptura por fluência do PET340 .....	164
Figura 5.30. Ruptura por fluência do PP500 .....	164
Figura 5.31. Ruptura por fluência do PET740 .....	164
Figura 5.32. Ruptura por fluência do PP925 .....	164
Figura 5.33. Comparação entre os ensaios mecânicos do PET340 .....	165
Figura 5.34. Comparação entre os ensaios mecânicos do PP500 .....	166
Figura 5.35. Comparação entre os ensaios mecânicos do PET740 .....	166
Figura 5.36. Comparação entre os ensaios mecânicos do PP925 .....	166
Figura 5.37. Ruptura por fluência no geotêxtil PET340 .....	169
Figura 5.38. Ruptura por fluência no geotêxtil PP500 .....	169
Figura 5.39. Ruptura por fluência no geotêxtil PET740 .....	169
Figura 5.40. Ruptura por fluência no geotêxtil PP925 .....	169
Figura 5.41. PET340 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes .....	170
Figura 5.42. PP500 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes .....	170
Figura 5.43. PET340 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes .....	171
Figura 5.44. PET340 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes .....	171

Figura 5.45. Desenvolvimento da tensão em relação à densidade relativa das areias utilizadas no puncionamento confinado.....	173
Figura 5.46. Desenvolvimento da deformação em relação à densidade relativa das areias utilizadas no puncionamento confinado .....	173
Figura 5.47. Areia marinha utilizada no puncionamento confinado em densidades diferentes .....	174
Figura 5.48. Resultados de tração direta do PET340 após exposição em laboratório .....	176
Figura 5.49. Resultados de tração indireta do PET340 após exposição em laboratório .....	176
Figura 5.50. Resultados de tração direta do PP500 após exposição em laboratório .....	177
Figura 5.51. Resultados de tração indireta do PP500 após exposição em laboratório .....	177
Figura 5.52. Resultados de tração direta do PET740 após exposição em laboratório .....	178
Figura 5.53. Resultados de tração indireta do PET740 após exposição em laboratório .....	178
Figura 5.54. Resultados de tração direta do PP925 após exposição em laboratório .....	179
Figura 5.55. Resultados de tração direta do PP925 após exposição em laboratório .....	179
Figura 5.56. Tensão e deformação do PET340 após exposição no campo.....	181
Figura 5.57. Tensão e deformação do PP500 após exposição no campo .....	182
Figura 5.58. Tensão e deformação do PET740 após exposição no campo.....	182
Figura 5.59. Tensão e deformação do PP925 após exposição no campo .....	182
Figura 5.60. Relações entre radiações do laboratório e do campo com o tempo ...	183
Figura 5.61. Relação entre o índice I do campo e do laboratório com o tempo .....	185
Figura 5.62. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PET340 .....	187
Figura 5.63. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PP500 .....	188
Figura 5.64. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PET740 .....	188

Figura 5.65. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PP925 .....	189
Figura 1. Detalhes das Microscopias do PET340 Degradado no Laboratório.....	236
Figura 2. Detalhes das Microscopias do PET740 Degradado no Campo .....	238

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Literatura técnica internacional com foco em geossintéticos .....	27
Tabela 2.2: Literatura técnica nacional com foco em geossintéticos .....	28
Tabela 2.3: Principais tipos de FTT e suas aplicações .....	31
Tabela 2.4: Valores de orçamentos de projetos hidráulicos .....	33
Tabela 2.5: Literatura técnica com foco nos mecanismos de falha das FTT .....	37
Tabela 2.6: Principais tipos de FTT e suas aplicações .....	38
Tabela 2.7: Fatores de segurança.....	41
Tabela 2.8: Principais tipos de FTT e suas aplicações .....	44
Tabela 2.9: Principais ensaios de caracterização em geossintéticos e suas normas	46
Tabela 2.10: Trabalhos de resistência à tração .....	50
Tabela 2.11: Trabalhos de puncionamento. ....	55
Tabela 2.12: Trabalhos de fluência não confinada .....	59
Tabela 2.13: Trabalhos de fluência com procedimentos especiais .....	60
Tabela 2.14: Trabalhos de com metodologia para avaliação da alterabilidade em materiais .....	73
Tabela 2.15: Trabalhos de degradação com exposição no campo .....	78
Tabela 2.16: Trabalhos de degradação com equipamento de termo oxidação .....	80
Tabela 2.17: Trabalhos de degradação com equipamento de radiação ultravioleta .	82
Tabela 2.18: Trabalhos de degradação com equipamento de exposição à líquidos .	83
Tabela 2.19: Trabalhos de degradação com equipamento de lixiviação contínua ....	84
Tabela 2.20: Trabalhos de degradação com equipamento de ciclagem de temperatura .....	85
Tabela 2.21: Trabalhos de degradação com equipamento de saturação e secagem .....	86
Tabela 2.22: Trabalhos de degradação com equipamento de névoa salina .....	87
Tabela 3.1: Massa dos ensaios de fluência convencional .....	94
Tabela 3.2: Massa dos ensaios de fluência acelerada .....	94
Tabela 3.3: Características dos ensaios de propriedades físicas em geotêxteis tecidos .....	108
Tabela 3.4: Características dos ensaios de propriedades mecânicas em geotêxteis tecidos .....	108

Tabela 3.5: Características dos ensaios de propriedades hidráulicas em geotêxteis tecidos .....	114
Tabela 3.6: Pesos referentes ao solo usado no ensaio no conjunto de peneiras utilizado.....	115
Tabela 3.7: Características dos ensaios de desempenho em geotêxteis tecidos ...	116
Tabela 3.8: Densidade da areia do mar .....	116
Tabela 3.9: Densidade da areia do rio .....	116
Tabela 4.1: Ensaios de caracterização física .....	123
Tabela 4.2: Dados de permissividade e permeabilidade dos geotêxteis .....	133
Tabela 4.3: Resultados de abertura de filtração dos geotêxteis .....	135
Tabela 5.1: Ensaios de caracterização física .....	145
Tabela 5.2: Resultados dos ensaios de tração direta com larguras diferentes dos geotêxteis .....	153
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de resistência à tração em diferentes garras.	154
Tabela 5.4: Resultado dos ensaios de resistência à tração com variação da distância entre garras do PP500 .....	156
Tabela 5.5: Resultados dos ensaios de tração indireta por puncionamento .....	159
Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de tração direta TD e tração indireta TI.....	160
Tabela 5.7: Estatística dos coeficientes dos ensaios de fluência convencional .....	161
Tabela 5.8: Estatística dos coeficientes dos ensaios de fluência por puncionamento .....	163
Tabela 5.9: Coeficientes dos ensaios de fluência acelerada em garras de tração..	167
Tabela 5.10: Coeficientes dos ensaios de fluência acelerada em garras de puncionamento .....	168
Tabela 5.11: Permissividade e permeabilidade dos geotêxteis após degradação no campo .....	171
Tabela 5.12: Permissividade e permeabilidade dos geotêxteis após degradação no laboratório.....	172
Tabela 5.13: Resultados de abertura de filtração dos geotêxteis após degradação .....	172
Tabela 5.14: Resultados de tensão direta após degradação por UV.....	174
Tabela 5.15: Resultados de tensão indireta após degradação por UV .....	175
Tabela 5.16: Resultados de deformação na tração direta após degradação por UV .....	175

Tabela 5.17: Resultados de deformação na tração indireta após degradação por UV .....	175
Tabela 5.18: Resultados de tensão direta após exposição no campo .....	180
Tabela 5.19: Resultados de tensão indireta após exposição no campo .....	180
Tabela 5.20: Resultados de deformação na tração direta após exposição no campo .....	181
Tabela 5.21: Resultados de deformação na tração indireta após exposição no campo .....	181
Tabela 5.22: Radiação acumulada dos ensaios acelerados e de campo .....	183
Tabela 5.23: Radiação acumulada dos ensaios acelerados e de campo .....	184
Tabela 5.24: Parâmetros de durabilidade do geotêxtil PET340 .....	186

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
UnB	Universidade de Brasília
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
LCQUI	Laboratório de Ciências Químicas
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
GeoLED	Laboratório de Ensaios de Durabilidade
FTT	Formas Têxteis Tubulares
REGEO	Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental
UV	ultravioleta
$h$	altura
$p_0$	pressão de bombeamento
$\gamma$	peso específico
$T$	resistência à tração
$T_{axial}$	esforço axial
FS	fator de segurança
$f_{cr}$	fluência ao longo do tempo
$f_f$	cargas inoperantes
$f_{ss}$	resistência da costura
$f_q$	cargas fixas na estrutura
$f_m$	resistência dos materiais na estrutura
$f_{mr}$	danos de instalação
$f_a$	durabilidade
$f_n$	implicações econômicas de falha estrutural
$f_p$	resistência ao arrancamento em reforço de taludes
$f_s$	resistência ao deslizamento em reforço de taludes
$T_{ult}$	tensão máxima necessária ao geossintético
$T$	tensão circunferencial
PE	polietileno
PP	polipropileno
PET	poliéster

PEAD	polietileno de alta densidade
PVC	policloreto de vinila
PA	poliamida
GTXw	geotêxteis tecidos
GTXn	geotêxteis não-tecidos
GBL	geomanta
GCE	geocélula
GCD	geocomposto
GGR	geogrelha
GMA	geomanta
GMB	geomembrana
GMT	geomatriz
GNT	georrede
GSP	geoespaçador
GST	geotira
GTX	geotêxtil
$\mu_A$	massa por unidade de área
$t_{GTX}$	espessura nominal
$n_{GTX}$	porosidade
$\rho_f$	massa específica da fibra de geotêxtil tecido
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
FTIR	infravermelho com transformada de fourier
CP	corpo de prova
F	força
$\sigma$	resistência à tração indireta
P	perímetro do pistão
$\alpha$	inclinação do geotêxtil
$L_f$	comprimento final do geotêxtil
$L_i$	comprimento inicial do geotêxtil
d	deslocamento na ruptura
R	raio da amostra
r	raio do pistão
D	módulo de rigidez a flexão
w	deslocamento do ponto

x	distância do ponto ao centro da amostra
$K_f$	comprimento final do geotêxtil de Kirchhoff
$K_i$	comprimento inicial do geotêxtil de Kirchhoff
$I_0$	índice de degradação do material intacto
$I_d$	índice de degradação do material degradado
I	índice de degradação
$I_{ult}$	índice de degradação máximo
$T_0$	estabilização do tempo de degradação
$I'_{ult l}$	índice de degradação máximo do laboratório ajustado
$I_{ult l}$	índice de degradação máximo do laboratório
$F_t$	fator tempo
t	tempo
$I_l$	o índice de degradação para as amostras laboratoriais
$I_{ult c}$	índice de I de degradação final para as amostras de campo
$T_c$	estabilização do tempo de degradação do campo
$T_l$	estabilização do tempo de degradação do laboratório
$\varepsilon$	deformação
TD	tração direta
TI	tração indireta
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
$k_n$	permeabilidade normal
y	permissividade
$O_{90}$	abertura de filtração
UV-B	ultravioleta B
UV-A	ultravioleta A
UV-C	ultravioleta C
UV-Vis	ultravioleta visível
CV	coeficiente de variação
C	parâmetro de inclinação do índice de fluência
d	parâmetro exponencial do índice de fluência
$\varepsilon_0$	índice de fluência
$\varepsilon_i$	deformação inicial
e	parâmetro de inclinação da deformação inicial

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1 Considerações Iniciais**

Em busca por soluções em diversos problemas hidráulicos e de estabilidade, houve um aumento da utilização de FTT nas últimas décadas. As FTT são estruturas tubulares, linear, produzida a partir de geossintéticos com a finalidade de conter materiais, de modo permanente ou provisório. Apresentam formato semelhante a cilindros, com alturas que variam de 50 a 500 cm e comprimento que podem chegar a 100 m. Seu preenchimento é feito por dragas ou grandes motobombas (VERTEMATTI, 2015). As FTT podem geralmente ser enrolados, entregues, desenrolado no local desejado, e, em seguida, preenchidos.

Como medida de controle de cheias em rio e de desastres ocorridos na zona costeiras, nos últimos anos, tem havido um aumento do uso de geotêxtil nestas regiões. As Formas Têxteis Tubulares (FTT) são alguns exemplos utilizados em obras hidráulicas. Como diques ou outros tipos de estruturas de proteção costeira, normalmente, estendem-se longitudinalmente a uma grande distância. E, uma pequena melhora no projeto pode resultar em uma quantidade significativa de poupança. Portanto, ele vai ter um grande benefício econômico e, assim, pode ser estabelecido como o método mais eficaz.

As FTT são usadas, principalmente, para proteção e controle de erosão. Podem ser utilizadas para a construção de diques, quebra-mares, dunas, e estruturas semelhantes. Existem várias vantagens em usá-las. Elas são rápidas e fáceis de construir, são eficientes em termos de custo, os materiais de preenchimento são sempre acessíveis, e não necessitam de maquinário pesado.

## **1.2 Objetivos da Tese**

Este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho dos geossintéticos sob ações do meio ambiente exógeno. Faz-se, especialmente, a avaliação de geotêxteis tecidos utilizados na construção de FTT. Foram estabelecidos protocolos especiais de laboratório para definição de ensaios visando à determinação das características de degradação destes materiais.

A proposta principal é avaliar a durabilidade de geossintéticos aplicados em FTT, utilizando procedimentos experimentais de laboratório, entre eles, realizar ensaios de tração e punção, com e sem fluência, usar técnicas de degradação acelerada simultaneamente aos ensaios que simulam as solicitações de campo e obter modelos que representem a durabilidade.

Para isso, foi necessária a construção de um equipamento especial para a pesquisa. Estudos no Laboratório de Ensaio de Durabilidade do LECIV/UENF em geossintéticos apresentaram, com SALLES (2006) e PINTO (2006), uma caracterização ampla de geotêxteis por diversos equipamentos de degradação e a saturação e secagem foi processo de degradação mais agressivo ao material. Neste sentido, a fluência combinada à degradação por saturação e secagem foi a opção escolhida para realizar os ensaios especiais

### **1.3 Escopo da Tese**

A tese está composta de 6 capítulos. Este Capítulo introduz o tema e apresenta os objetivos da pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 2 exibe uma extensa revisão da literatura sobre a classificação das FTT e sobre os agentes de degradação, além dos principais mecanismos e procedimentos de degradação observados nos materiais geossintéticos neles aplicados. São destacados os principais ensaios utilizados e suas principais características.

O Capítulo 3 expõe o programa experimental e o material de estudo, o equipamento de degradação implementado, os ensaios utilizados, os procedimentos, as normas e a metodologia empregada.

O Capítulo 4 fornece os resultados dos ensaios realizados nos geotêxteis utilizados na pesquisa e o Capítulo 5 aborda discussões dos ensaios e principais comparações entre eles.

O Capítulo 6 encerra o trabalho, com a apresentação das conclusões. São relacionadas as principais observações referentes à tese e são propostas recomendações para futuras pesquisas.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo propõe uma revisão bibliográfica referente ao estudo do comportamento geomecânico e da durabilidade de geossintéticos utilizados em obras geotécnicas na forma de FTT. Neste sentido, serão apresentadas considerações fundamentais sobre o tema, englobando aspectos relativos ao uso destes materiais aplicados em obras hidráulicas; seu tempo de vida útil em obra, destacando as características e aplicações como proteção costeira; e, finalmente, são expostos os modelos constitutivos que caracterizam o comportamento deste material submetido aos esforços solicitantes no campo.

### 2.2 Literatura Técnica

As primeiras FTT datam da década de 50. No entanto, a literatura técnica sobre pesquisas e uso da FTT é escassa. Um dos primeiros registros que merece destaque é o trabalho dos canadenses AVULA E URAL (1972) onde foi analisado o sistema de deformações de um FTT impermeável preenchido com gás e líquido.

ARMSTRONG (1976) em '*Coastal Engineering Proceedings*', GUTMAN (1979) em '*Coastal Structure*' e LIU E SILVESTER (1977) na '*Sixth Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference*' completam a lista de trabalhos que caracterizam o tema. Há, seguramente, mais trabalhos dentro deste período, o que se pôde verificar pelas referências destes autores. Entretanto, foi grande a dificuldade para encontra-los e disponibilizá-los para a pesquisa. É a partir desta década que, realmente, surgem os eventos e as revistas que criaram o acervo técnico mais acessível aos pesquisadores.

A Tabela 2.1 e Tabela 2.2 expõem este panorama e identificam todos os principais congressos da área a nível nacional e internacional. Vale destacar que há muitos outros eventos, entre eles, nacionais, regionais e locais, que tornam ainda mais difícil encontrar disponível e avaliar os trabalhos que neles são divulgados. São apresentados também, as principais revistas e sites que divulgam em grande diversidade de conteúdo sobre os geossintéticos.

**Tabela 2.1: Literatura técnica internacional com foco em geossintéticos**

Nível	Ano	Congresso/Site/Revista	Local
Global	1977, 1982, 1986, 1990, 1994, 1998, 2002, 2006, 2010, 2014	<i>International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics / International Conference on Geotextile</i> - a partir de 1982	Paris, Las Vegas, Viena, The Hauge, Cingapura, Atlanta, Nice, Yokohama, Guarujá, Berlin
	1984	Revista <i>Geotextile and Geomembranes</i>	<a href="http://www.journals.elsevier.com/geotextilesand-geomembranes/">http://www.journals.elsevier.com/geotextilesand-geomembranes/</a>
	1994	Revista <i>Geosynthetics International</i>	<a href="http://www.icevirtuallibrary.com/journal/jgein">http://www.icevirtuallibrary.com/journal/jgein</a>
	1999	Site Geosynthetica	<a href="http://www.geosynthetica.net/">http://www.geosynthetica.net/</a>
Continental	1996, 2000, 2004, 2008, 2012, 2016	EuroGeo / European Geosynthetics Congress	Maastricht, Bolonha, Munique, Edinburgh, Valencia, Instabul
	1997, 2000, 2004, 2008, 2012, 2016	GeoAsia / Asian Geosynthetics Congress	Bangalore, Kuala Lumpur, Seoul, Changai, Bangkok, Nova Deli
	2008, 2012, 2016	GeoAmericas/Panamerican GeosyntheticsCongress	Honduras, Lima, Miami
	2009, 2013	GeoAfrica / African Geosynthetics Congress	Cidade do Cabo, Accra

As Tabelas mostram que o primeiro congresso surge em 1977, a *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics* em Paris. Sendo assim, os primeiros trabalhos desta década são mais difíceis de se encontrar. Em âmbito nacional, a partir da Revista *Soil and Rocks*, alguns trabalhos em geossintéticos foram publicados, bem como a criação de uma sessão exclusiva no Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. Em 2001, houve a única edição do Geossiga - Seminário Nacional sobre Geossintéticos na Geotecnia Ambiental em São José dos Campos e a consolidação do Congresso Brasileiro de Geossintéticos - REGEO.

**Tabela 2.2: Literatura técnica nacional com foco em geossintéticos**

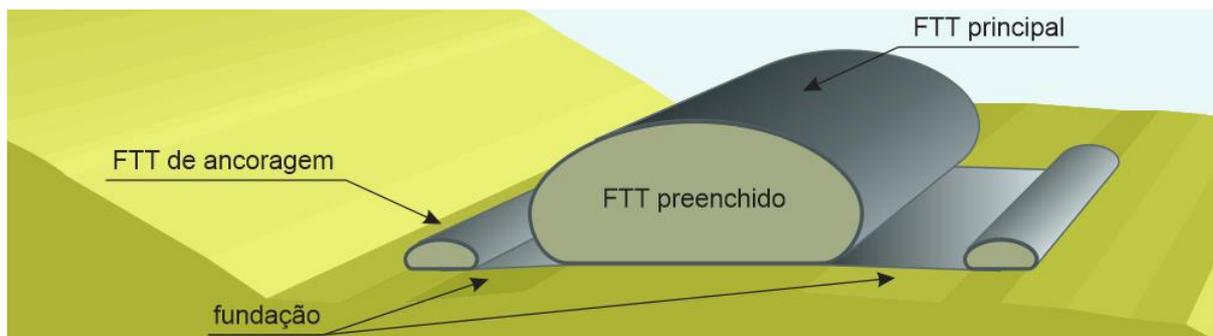
Nível	Ano	Congresso/Site/Revista	Local
Internacional	1978	Revista Solos e Rochas/ Revista Latino Americana de Geotecnia – a partir de 1998 / <i>Soil and Rocks</i> – a partir de 2007	<a href="http://www.soilsandrocks.com.br/">http://www.soilsandrocks.com.br/</a>
	1954, 58, 66, 70, 74, 78, 82, 86, 90, 94, 98, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016	Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos	Porto Alegre (PA), Recife, Belo Horizonte (BH), Rio de Janeiro (RJ), São Paulo (SP), RJ, Olinda, PA, Salvador, Foz do Iguaçu, Brasília, SP, RJ, SP, Búzios, Gramado, Porto de Galinhas, Goiânia, BH
Nacional	1992, 1995, 1999, 2003, 2007, 2011, 2015	Seminário sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia / Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia – a partir de 1995 / REGEO – a partir de 2003)	Brasília, SP, RJ, Porto Alegre, Recife, BH, Brasília

## 2.3 Formas Têxteis Tubulares - FTT

### 2.3.1 Definição

As FTT, também chamados de geotubos, tubos de geotêxteis, tubos, salsichão, espigão, entre outras nomenclaturas existentes, são estruturas tubulares de geossintéticos, com diâmetros que variam de um a vários metros e com comprimento teoricamente infinito (Figura 2.1). Elas podem ser preenchidas com ar, água e solo. Além da contenção de processos erosivos em rios e mares, também podem ser utilizadas para estabilidade de taludes.

**Figura 2.1. Esquemático das FTT e suas características básicas**



### 2.3.2 Breve Histórico

De acordo com KOFFLER *et al.* (2008), foi uma catástrofe que atingiu o sudoeste da Holanda, em 1953, matando 1.850 pessoas, destruindo 4.500 casas e deixando 100.000 pessoas desabrigadas, o marco que deu início à história das FTT. A busca por soluções em aplicações de proteção costeira começou logo após esta tragédia. A partir deste momento, por meio do desafio apresentado pelas autoridades holandesas, engenheiros propuseram a utilização de produtos têxteis em estruturas marinhas na forma de FTT. Foram utilizados mais de 10 milhões de metros quadrados de geossintéticos neste empreendimento conhecido como Projeto Delta.

PERRIER (1986), SEHGAL (1996) e JONGELING E ROVEKAMP (1999) descrevem melhor o Projeto Delta. Segundo os autores, para proteger o litoral Oeste de Overijssel, uma província da Holanda, contra as inundações do Lago IJsselmeer e Rio Ketelmeer, foi construída uma barreira contra tempestade constituída por geomembrana (Figura 2.2a). O material utilizado para preenchimento foi uma combinação de ar e água por meio de insuflação. Isto minimizou as dimensões das FTT e também permitiu ajustar rapidamente a altura da barragem conforme a necessidade (Figura 2.2b). A barreira de proteção daquela região foi composta por três FTT e as dimensões projetadas foram: comprimento igual a 75 m, largura igual a 13 m e altura igual a 8,35 m (Figura 2.2c).

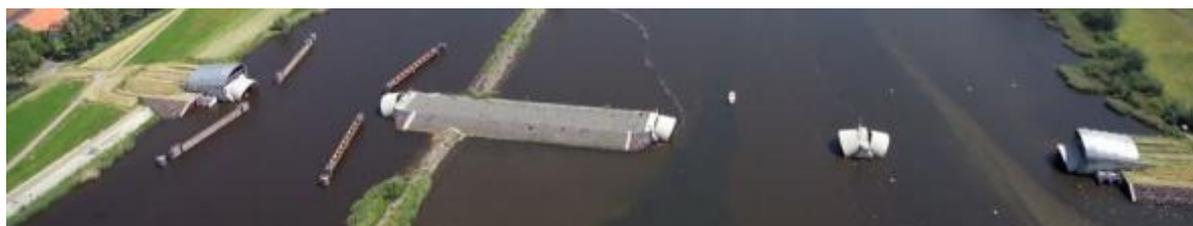
**Figura 2.2. Barreira contra tempestade da Holanda**



(a) barreira contra tempestade constituída de geomembrana



(b) FTT insuflado sob solicitação



(c) visão geral da região de Overijssel com a localização das três FTT com comprimento de 75 m

Fonte: SEHGAL (1996) e JONGELING e ROVEKAMP (1999)

Nas décadas seguintes, soluções como esta foram propostas em outros países, com destaque para Alemanha e Estados Unidos, logo após o sucesso que havia sido notificado na Holanda. KOFFLER *et al.* (2008) e WILKE *et al.* (2015a) listam grandes obras em 5 países: a Figura 2.3a apresenta Pit Lake, na Alemanha, um projeto de estabilização da margem de um lago e a Figura 2.3b New Jersey, Estados Unidos, a estabilização de um litoral com forte processo de erosão costeira; em Amwaj Islands, Bahrein, foram utilizados 30 km de FTT de 2,6 m de altura na primeira fase do projeto e, em seguida, outra FTT completando uma altura de 3,6 m para formação de um dique para as ilhas artificiais do país (Figura 2.3c); Zoutkamp, na Holanda, um projeto de estabilização de taludes em barragem (Figura 2.3d); em Rabat, Marrocos, 3 FTT de 65 m de comprimento, 15 m de circunferência e 3 m de altura, foram a solução proposta para a Barragem de Sidi Mohamed Ben Abdellah (Figura 2.3e).

**Figura 2.3. Obras com FTT pelo mundo**



**Fontes:** <sup>1</sup>Koffler *et al.* (2008) e <sup>2</sup>Wilke *et al.* (2015a)

BOGOSSIAN *et al.* (1982) descreveram o uso de FTT como diques em duas regiões no Brasil. Em Cubatão, São Paulo, o projeto foi concluído em um terço do tempo previsto do que se fossem usados diques convencionais. Também foram descritos testes similares realizados no estuário em São Luís no Maranhão, em 1981. Este, em particular, foi o primeiro com preenchimento hidráulico com areia, realizado para contenção de aterro hidráulico no Brasil.

### 2.3.3 Características Gerais

As FTT podem ser classificadas em permeável, impermeável ou inflável. Os materiais utilizados para preenchimento e algumas referências para exemplos de aplicações de cada tipo de FTT são citadas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3: Principais tipos de FTT e suas aplicações**

Tipo	Preenchimento	Aplicação	Referências
Permeável	Areia, argila misturada com cimento e argamassas.	Diques	FOWLER (1997), YAN E CHU (2005), NISHOLD <i>et al.</i> (2014)
		Erosão costeira	KIM <i>et al.</i> (2004), OH E SHIN (2006), KOERNER E KOERNER (2006), ALVAREZ <i>et al.</i> (2007), SHIN E OH (2007)
		Desidratação de resíduos	FOWLER <i>et al.</i> (2000), PERRY (1993)
Impermeável	Água, pasta de argila, lama ou outros materiais residuais	Controle de inundação	FOWLER (1997), PLAUT E SUHERMAN (1998)
		Contenção de materiais contaminantes	SZYSZKOWSKI E GLOCKNER (1987)
		Diques; Quebra-mar	ALVAREZ <i>et al.</i> (2007)
		Controle do nível de água e desvio	SEHGAL (1996), TAM (1997)
Inflável	A água e/ou ar	Barragens	SEHGAL (1996); ZHANG <i>et al.</i> (2002)
		Vertedouros e desvio de água	TAM (1997)
		Quebra-mar	SAATHOFF <i>et al.</i> (2007); KOFFLER <i>et al.</i> (2008)
		Contaminação e controle de inundação	WATSON <i>et al.</i> (1999)

Para proteção e restauração de praias, as FTT são, em sua maioria, dimensionadas como elementos permeáveis. Cada projeto especifica diâmetro e comprimento necessários de acordo com a aplicação. Essas características são influenciadas pelo processo de execução da FTT. Segundo SARTI E LARSEN (1983), LESHCHINSKY (1993) e ERCHINGER (1993), o diâmetro final da FTT é influenciado pela altura da FTT de queda do material dragado e pela pressão de bombeamento. De acordo com PERRY E MYERS (1993) e PILARCZYK E ZEIDLER (1997), o empilhamento das FTT pode ser outra estratégia para alcançar maiores alturas quando o diâmetro não é suficiente ao projeto.

Dependendo do projeto, as FTT podem estar mais ou menos suscetíveis à radiação solar. Sendo assim, os raios ultravioletas do sol podem provocar redução na resistência do geossintético. Para evitar isso, as FTT podem ser cobertas por outros geossintéticos (JOHN, 1987), ou revestidas com acrílico ou cloreto de polivinila (GUTMAN, 1979). Durante a fabricação, pode haver adição de estabilizadores de UV como negro de fumo e antioxidante para proteção contra as radiações solares de ultravioleta (DEN HOEDT, 1989 e LODI *et al.* (2007).

A utilização de FTT em obras hidráulicas requer conhecer mais características a fim de se determinar os fatores que implicarão no dimensionamento e no comportamento geomecânico. Esta aplicação do geossintético é tubular, de seção transversal normalmente elíptica, podendo ser circular, a qual exige fixação das bordas longitudinal e transversal por costura (Figura 2.4), solda ou cola (LIU e SILVESTER, 1977). Geralmente, as ligações por costura são mais fracas que a resistência do geossintético, de modo que o dimensionamento se baseia na resistência da costura (KOERNER e KOERNER, 2006). LESHCHINSKY (1993) considera a utilização de uma camada interna de tecido para adicionar maior proteção contra falha da costura.

**Figura 2.4. Tipos de costura de FTT**



(a) Costura longitudinal



(b) Costura transversal

Fonte: WILKE *et al.* (2015a)

LEE E DOUGLAS (2012) destacam outras duas características relacionadas à composição química e à resistência mecânica das FTT. Elas são fabricadas normalmente em polipropileno com elevada resistência à tração, variando entre 100 a 200 kN/m em ambas as direções. Portanto, a escolha da fixação das bordas deve satisfazer tais resistências.

Como é caracterizado na Tabela 2.3, o preenchimento da FTT pode ser areia dragada por via úmida no próprio local onde ela será instalada. As pressões de bombeamento são de acordo com especificações de projeto e estão diretamente ligadas à geometria das FTT. Pressões altas significam relação entre largura e altura da FTT próximas de um, enquanto baixas pressões apresentam relações entre largura e altura que podem chegar até oito vezes, segundo LESHCHINSKY *et al.* (1996).

SHI e OH (2007), KOERNER e KOERNER (2006), LEE e DOUGLAS (2012) e HEIBAUM (2014) descrevem a instalação da FTT como simples, de baixos custos e impacto sobre o meio ambiente, provando ser uma alternativa viável comparada às técnicas tradicionais de enrocamento. ARMSTRONG (1976) e RESTALL *et al.* (2002) apresentam orçamentos de algumas obras de proteção costeira comparando a utilização de FTT com outras soluções e mostram que os custos totais ao final do empreendimento alcançaram economia de até 60% (Tabela 2.4).

**Tabela 2.4: Valores de orçamentos de projetos hidráulicos**

Referências	Local	Custos	
		Com FTT	Com Enrocamento
ARMSTRONG (1976)	South of Port Sanilac	U\$ 82/m a U\$ 213/m	U\$ 328/m a U\$ 656/m
RESTALL <i>et al.</i> (2002)	North Kirra Groyne	Aus\$ 350 mil	Aus\$ 600 mil
	Narrowneck Reef	Aus\$ 2,5 milhões	Aus\$ 5 milhões

A obra em South of Port Sanilac é apresentada no projeto dividida em 19 áreas de acordo com ARMSTRONG (1976). A faixa de variação dos custos é devida, principalmente, às características da erodibilidade encontrada no local. RESTALL *et al.* (2002) exhibe, em seu artigo, detalhes do projeto. YEE *et al.* (2014) apresentam uma obra em Saemangeum na Coreia do Norte, em que foi possível economizar U\$ 6,2 milhões e evitar o lançamento de 230 mil toneladas de gás carbono nesta obra de quase 34 km no litoral da Coreia do Sul.

As principais características das FTT evidenciam várias vantagens de usá-las em oposição aos métodos mais convencionais, como foi mencionado nos exemplos de utilização de enrocamento. E, são a partir destas condições de trabalho que esta tecnologia vem sendo empregada amplamente em obras geotécnicas hidráulicas. Então, para que haja um bom dimensionamento destas estruturas, deve-se conhecer bem o comportamento geomecânico das FTT.

### 2.3.4 Comportamento Geomecânico

#### Comportamento Local

As solicitações de campo nos geossintéticos utilizados em FTT provocam o desenvolvimento de tensões por tração e/ou puncionamento causando deformações ou ruptura, que podem ser prejudiciais à vida útil do material. As deformações podem ocorrer de forma rápida ou de forma lenta (Figura 2.5).

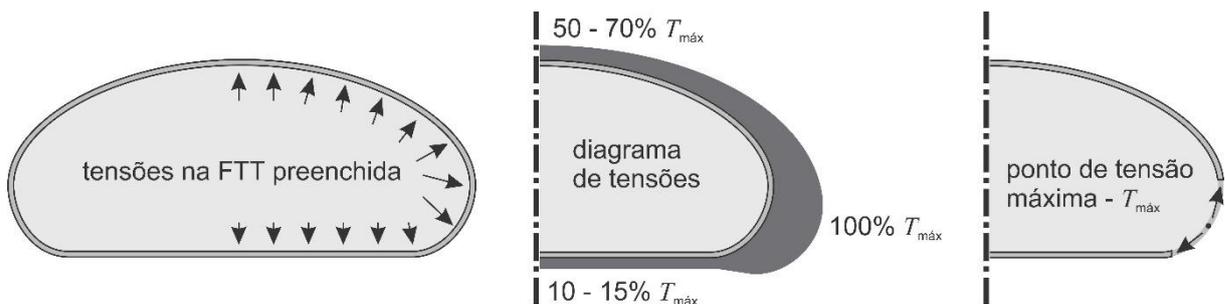
Figura 2.5. FTT vazio e preenchido



Fonte: WILKE et al. (2015a)

Dentre as principais solicitações de campo da FTT, o preenchimento é, talvez, o momento em que ocorre a mobilização dos maiores níveis de tensões. Este procedimento é realizado, normalmente, com material granular (Tabela 2.3) e provoca o surgimento de tensões tangenciais na superfície da FTT - que devem ser absorvidas pelo geossintético, não permitindo deformações excessivas ou a sua própria ruptura. A Figura 2.6 mostra como ocorre o desenvolvimento destas tensões de tração.

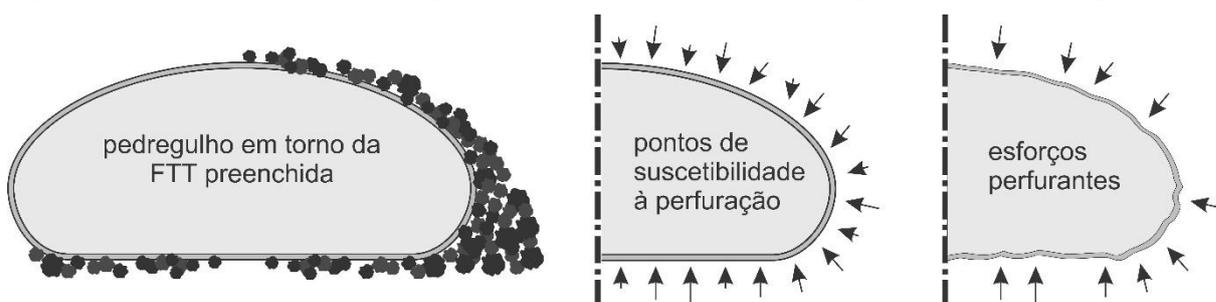
Figura 2.6. Esquemático de esforços que mostra o geotêxtil sendo tracionado



LIU e SILVESTER (1977), SARTI e LARSEN (1983), LESHCHINSKY *et al.* (1996) e PLAUT e STEPHENS (2012), analisam que, no preenchimento da FTT, a pressão de bombeamento influencia o dimensionamento, a geometria e o desempenho desta obra hidráulica. LEE e MANJUNATH (2000), PLAUT e STEPHENS (2012) descrevem que o atrito de interface entre o material de preenchimento e a FTT pode causar significativa mudança em seu comportamento devido ao aumento das tensões na face interna do material.

Outra solicitação importante em projetos de FTT é o puncionamento. Sua ocorrência é em forma de cargas pontuais na superfície do geotêxtil, geralmente provocados por pedregulhos, que aumentam a susceptibilidade à perfuração. Estes elementos perfurantes podem se localizar na base ou na parte superior da FTT, seja como agentes antrópicos e/ou enrocamento de proteção (Figura 2.7).

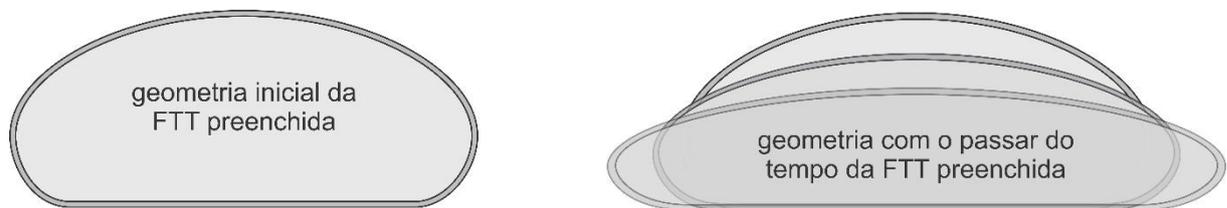
**Figura 2.7. Esquemático de esforços mostra o puncionamento no geotêxtil por pedregulho**



RESTALL *et al.* (2002) e HORNSEY *et al.* (2011) apresentam o vandalismo como uma forma de perfuração muito comum em obras hidráulicas, seja por pequenos furos gerados por elementos pontiagudos não intencionais, seja por ocorrência de cortes furtivos. GAMSKY (1984), TAFFE JUNIOR (2002), DIAS FILHO *et al.* (2015b) e DIAS FILHO *et al.* (2016c) destacam a necessidade de se estudar mais sobre a interação solo e geotêxtil sob este tipo de condição e obter melhores respostas dessas regiões. GIROUD (1984) e HORNSEY e WISHAW (2011) descrevem elementos naturais como concentradores de tensões. Nestes casos, a espessura do geossintéticos é importante para prevenir a perfuração. Considerando estas observações, poder-se-ia negligenciar este tipo de solicitação ao geossintético, uma vez que o aumento da espessura é uma prática que minimiza os efeitos da perfuração ou o acréscimo de uma segunda camada para proteção KOERNER *et al.* (2010), como ocorre para elementos sem proteção ultravioleta destacados por JOHN (1987).

Além das deformações rápidas provocadas pelas solicitações de campo, desde a dragagem de material para dentro das FTT até o empilhamento necessário para alcançar alturas especificadas em projeto, os geossintéticos aplicados nas FTT também sofrem deformações lentas por fluência (Figura 2.8). Estas deformações são muito importantes no dimensionamento de geossintéticos. Particularmente, nas FTT, o efeito da fluência merece destaque especial tendo em vista que os projetos exigem significativa vida útil. Considerando os agentes exógenos a que as FTT são expostas, estas deformações podem ser aceleradas. LESHCHINSKY *et al.* (1996), PERKINS (2000), ALVAREZ *et al.* (2007) e CANTRÉ e SAATHOFF (2011) destacam a fluência como uma propriedade fundamental para construir FTT.

**Figura 2.8. Esquemático caracterizando a fluência no geotêxtil com o tempo.**



### *Comportamento Global*

A utilização das FTT como estruturas de quebra-mar pode necessitar estudos de dimensionamento em que são necessárias análises quanto ao empilhamento, à estabilidade de taludes costeiros (Figura 2.9a) e ao impacto das ondas (Figura 2.9b).

**Figura 2.9. Comportamento global de FTT**



(a) Estabilidade de taludes<sup>1</sup>



(b) Impacto de ondas<sup>2</sup>

Fonte: <sup>1</sup>WILKE *et al.* (2015a) e <sup>2</sup>WILKE *et al.* (2015b)

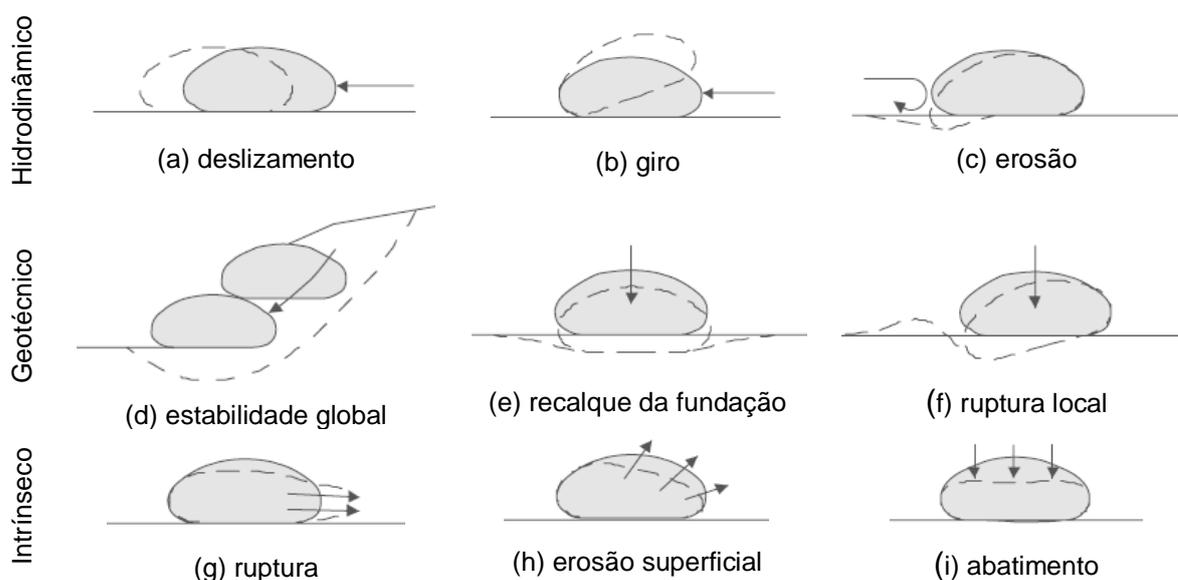
Existem dois fatores em que pode haver ocorrência de falhas nessas estruturas hidráulicas. Eles influenciam na estabilidade das FTT e são conhecidos como mecanismo de falha hidrodinâmico ou geotécnico. KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA (2014) e NISHOLD *et al.* (2014) apresentam os mecanismos e as informações que envolvem o dimensionamento dessas estruturas. Basicamente, há alteração na geometria da FTT e problemas de estabilidade em elementos com diâmetro inferior a 2 metros e quando o preenchimento da FTT fica abaixo de 80% de capacidade.

A Tabela 2.5 ilustra estudos publicados em artigos técnicos focando os mecanismos de falha das FTT aplicadas em obras hidráulicas. São expostos, na Figura 2.10 'a', 'b' e 'c', mecanismos de falha hidrodinâmico e, na Figura 2.10 'd', 'e' e 'f', mecanismos de falha geotécnico. Há, ainda, a Figura 2.10 'g', 'h' e 'i', que exhibe falhas intrínsecas ao geossintético utilizado.

**Tabela 2.5: Literatura técnica com foco nos mecanismos de falha das FTT**

Mecanismo de Falha	Referências
Hidrodinâmico	VAN STEEG <i>et al.</i> (2011)e, NEVES <i>et al.</i> (2011), BEZUIJEN E PILARCZYK (2012), KIM <i>et al.</i> (2014), NISHOLD (2014), KUNZ <i>et al.</i> (2014)
Geotécnico	LIU (1981), KOBAYASHI E JACOBS (1985), CARROLL (1994), DEN ADEL <i>et al.</i> (1996), LAWSON (2008), KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA (2014)
Intrínseco	LESHCHINSKY <i>et al.</i> (1996), ALVAREZ <i>et al.</i> (2007), SHIN E OH (2007), MALÍK (2009), BRUSCAS (2015), KUNZ <i>et al.</i> (2014)

**Figura 2.10. Ilustrações dos mecanismos de falha de FTT**



Fonte: modificado de LAWSON (2008)

### 2.3.5 Aspectos do Projeto de Dimensionamento

A FTT tem sido utilizado em projetos de engenharia hidráulica e costeiras há muitos anos. Com seu surgimento, vários estudos analíticos foram realizados, a fim de garantir maior segurança ao dimensionamento dos elementos constituintes destas grandes obras. A maior parte destes estudos é analisada de forma bidimensional, considerando a pressão de enchimento e peso do tecido desprezível. Cada autor da literatura técnica e sua proposta tem por base algumas hipóteses simplificadas e, portanto, só são aplicáveis a determinadas condições. Por esta razão, é necessário classificar os tipos de FTT de geossintéticos e fornecer uma análise crítica sobre a aplicabilidade de cada método analítico em cada tipo de projeto. A Tabela 2.6 elenca autores, dimensionamento referentes à utilização da FTT e conceitos envolvidos de acordo com sua característica.

**Tabela 2.6: Principais tipos de FTT e suas aplicações**

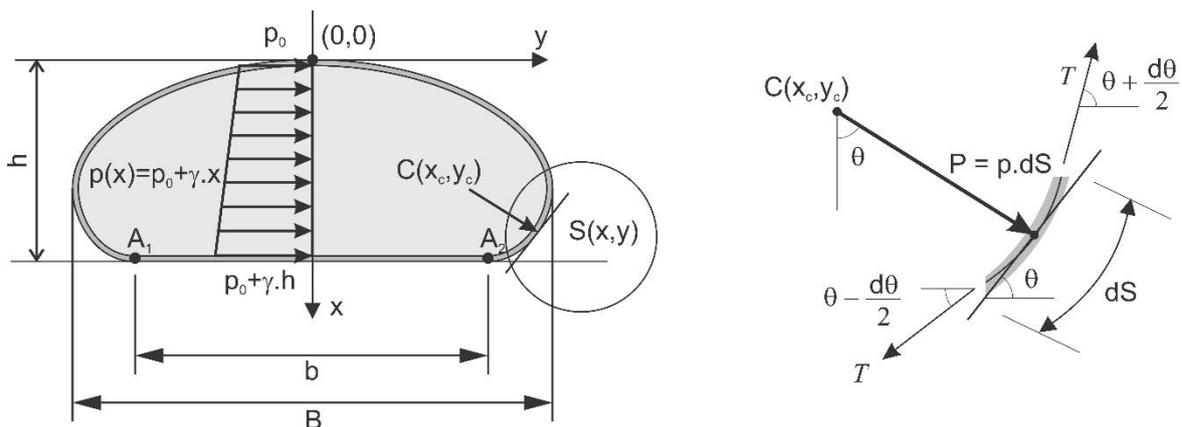
Tipo	Referências	Observação
Permeável	LIU (1981), SILVESTER (1986), KAZIMIEROWICS (1994) e CARROLL (1994) e SHIN e OH (2003)	O problema é bidimensional. O peso do geossintético e a perda de pressão por drenagem são desprezados. Deve-se avaliar a pressão de enchimento do material dragado e seu estado de tensão na FTT é hidrostático. Não se desenvolvem pressões de cisalhamento.
	LESHCHINSKY e LESHCHINSKY (1996), LESHCHINSKY <i>et al.</i> (1996)	LESHCHINSKY e LESHCHINSKY (1996) e LESHCHINSKY <i>et al.</i> (1996) desenvolvem um software que avalia a geometria e tensões na FTT.
	SHIN e OH (2004) e PLAUT e SUHERMAN (2012)	SHIN e OH (2004) e PLAUT e SUHERMAN (2012) descrevem método para cálculo do abatimento do fluido dragado.
Impermeável	[LIU e SILVESTRE (1977), HSIEH <i>et al.</i> (1989), HSIEH e PLAUT (1990), PLAUT e SUHERMAN (1998), MALÍK (2009), CANTRÉ e SAATHOFF (2011), GUO <i>et al.</i> (2011) E GUO <i>et al.</i> (2013)] <sup>1</sup>	O problema é bidimensional. Fundação em base rígida e o peso do geossintético são desprezados.  <sup>1</sup> Para os autores que avaliaram fluido aquoso: deve-se avaliar a pressão de enchimento do material dragado e não se desenvolvem pressões de cisalhamento. O líquido de enchimento é incompressível
	[AVULA e URAL (1972), ANTMAN e SCHAGERL (2005), PLAUT e COTTON (2005), GHAVANLOO e DANESHM (2009a e 2009b)] <sup>2</sup>	<sup>2</sup> Para os autores que avaliaram fluido gasoso: a membrana é considerada inextensível e sem rigidez à flexão. Tensão tangencial na FTT é zero e a pressão de ar interna é constante dentro da área de secção transversal.
	[CHU <i>et al.</i> (2011), YAN e CHU (2010) e GUO <i>et al.</i> (2014)] <sup>3</sup>	<sup>3</sup> Para os autores que avaliaram fluido com solo: analisa-se a consolidação do material na FTT.

De acordo com as observações apresentadas, são levadas em consideração algumas características da FTT, principalmente quanto a sua geometria. LIU e SILVESTER (1977), por exemplo, quando introduziram o dimensionamento desses elementos à literatura técnica, encontraram uma relação entre a circunferência, pressão de bombeamento, região de contato com o solo, altura da seção transversal preenchida e sua largura. Sendo assim, eles conseguiram determinar as tensões provocadas ao geossintético, exceto quando ocorre atrito entre a FTT e o chão. Em seu trabalho, os autores obtiveram resultados experimentais concordando com resultados teóricos.

LIU (1981) propõe uma equação com o equilíbrio de forças no interior da FTT e as tensões no geotêxtil. Seu estudo teórico concordou com os resultados experimentais. Foi feito também um estudo experimental sobre o impacto das ondas, a partir do qual se podem determinar as dimensões mínimas da FTT conhecendo o coeficiente de atrito entre o leito do mar e o geossintético.

LESHCHINSKY, *et al.* (1996) e LESHCHINSKY e LESHCHINSKY (1996) estudaram a geometria da FTT e determinaram suas tensões axiais e circunferenciais (Figura 2.11). O resultado do projeto avalia o potencial do software GeoCoPS criado pelos autores. O programa foi testado com os trabalhos de SILVESTRE (1977), LIU (1981), e KAZIMIEROWIZ (1994) e apresentou bons resultados.

**Figura 2.11. Geometria da FTT e as tensões geradas pelo preenchimento**

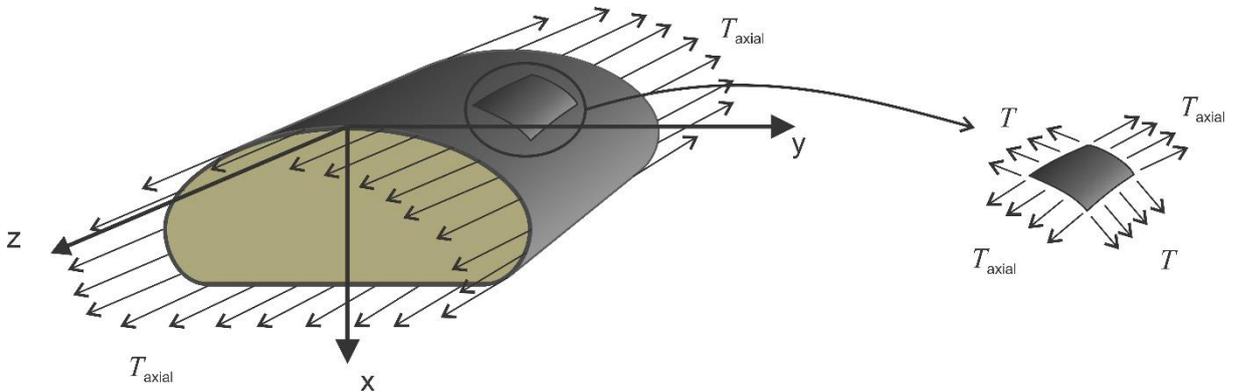


Fonte: modificado de (LESHCHINSKY e LESHCHINSKY, 1996)

De acordo com os autores relacionados na Tabela 2.6, para elementos permeáveis, o dimensionamento mecânico das FTT é baseado no equilíbrio de forças mostrado na Figura 2.11, permitindo o cálculo da tração circunferencial. As considerações para dimensionamento das FTT são válidas para qualquer ponto ao

longo de  $A_1OA_2$ . É assumido ainda que não ocorre cisalhamento na interface de contato da FTT,  $A_1A_2$ , com a fundação. Esta força de tração axial que atua na FTT, na direção longitudinal paralela ao seu comprimento, está representada na Figura 2.12.

**Figura 2.12. Esquemático de forças na FTT**



Naturalmente,  $T$  é maior que  $T_{axial}$ , fato que deve ser levado em conta no projeto e que pode conduzir à utilização de geossintéticos anisotrópicos mais econômicos, especialmente desenvolvidos para determinados projetos. Sendo assim, a análise da FTT torna a força circunferencial e axial no geossintético em condições de carga de trabalho. No entanto, o geossintético deve possuir resistência final adequada e, para isso, fatores de redução devem ser aplicados.

### **2.3.6 Fatores de Segurança - FS**

Projetos de dimensionamento têm por objetivo determinar os esforços solicitantes do geossintético aplicado na obra. Devido às incertezas com relação aos parâmetros adotados ou os métodos de cálculo, costuma-se majorar os esforços solicitantes calculados, obtendo-se a sollicitação mínima requerida do geossintético a ser utilizado. Porém, nos estudos com geossintéticos, os vários fatores intrínsecos e extrínsecos relativos à sua aplicação, conduzem a reduzir o valor de sua resistência à tração através do conceito de fator de segurança.

Para FTT, LESHCHINSKY *et al.* (1996) destacam o uso de quatro FS apresentados em negrito na Tabela 2.7. A tabela exhibe todos os fatores aplicados aos geossintéticos e que são utilizados de acordo com as exigências de projeto.

Para a especificação da resistência à tração do geossintético componente da FTT, devem-se majorar as tensões de projeto através dos fatores de segurança correlacionados pela Tabela 2.7 e Equação 1 e 2.

**Tabela 2.7: Fatores de segurança**

Fator	Sigla	Valores <sup>1</sup>	
		Mínimo	Máximo
Fator de segurança total	FS	3	28
<b>Fluência ao longo do tempo</b>	<b><math>f_{cr}</math></b>	<b>2</b>	<b>5</b>
Cargas inoperantes	$f_f$	-	-
<b>Resistência da costura</b>	<b><math>f_{ss}</math></b>	<b>2</b>	-
Cargas fixas na estrutura	$f_q$	-	-
Resistência dos materiais na estrutura	$f_m$	1,05	1,4
<b>Danos de instalação</b>	<b><math>f_{mr}</math></b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>
<b>Durabilidade</b>	<b><math>f_a</math></b>	<b>1,05</b>	<b>1,5</b>
Implicações econômicas de falha estrutural	$f_n$	-	-
Resistência ao arrancamento em reforço de taludes	$f_p$	-	-
Resistência ao deslizamento em reforço de taludes	$f_s$	-	-

Fonte: <sup>1</sup>LESHCHINSKY *et al.* (1996)

$$T_{ult} = T \cdot FS \quad [1]$$

$$FS = f_{mr} \cdot f_{ss} \cdot f_a \cdot f_{cr} \quad [2]$$

onde,

$T_{ult}$  é a tensão máxima necessária ao geossintético em kN/m;

$T$  é a tensão circunferencial calculada no dimensionamento em kN/m;

$FS$  é a fator de segurança total;

$f_{mr}$  é a fator de segurança por danos instalação. Refere-se a incertezas no processo de enchimento da FTT com a pressão de bombeamento e/ou a danos causados por agentes exógenos. LESHCHINSKY *et al.* (1996) mostram que uma pressão de bombeamento ligeiramente maior que a definida em projeto implica no aumento exponencial das tensões no geossintético, podendo causar ruptura local ou na costura. Outro caso de dano é destacado por SILVA *et al.* (2014), onde se observa este problema no lançamento de material de proteção sobre o geossintético em obras;

$f_{ss}$  é a fator de segurança para a costura. LESHCHINSKY *et al.* (1996) destacam que a resistência da costura pode ser baixa quando comparada à resistência geotêxteis tecidos. O valor mínimo recomendado é 2 e pode ser determinado utilizando a ASTM D4884. Uma preocupação da costura são os defeitos que podem tornar a FTT ineficaz em conter o material de preenchimento;

$f_a$  é a fator de segurança para durabilidade. Na prática, avaliam-se os principais mecanismos de degradação do geossintético no projeto. O contato com chorume, por exemplo, pode causar danos químicos e a ASTM D5322-98 é usada para orientação. Além disso, a degradação química pode ser causada externamente pela exposição direta ao sol e sua radiação ultravioleta. O procedimento de teste é especificado na norma ASTM D4355/G154. Para MÜLLER (2014) e LESHCHINSKY *et al.* (1996), a degradação biológica não é um problema na maioria dos casos em FTT;

$f_{cr}$  é o fator de segurança de fluência. Toda estrutura tem um tempo de vida de projeto estabelecido e o principal parâmetro de avaliação deste tempo é a fluência, onde se limitam a estrutura projetada e as deformações que sejam toleráveis. O comportamento de fluência de um geossintético pode ser determinado utilizando o teste especificado na norma ASTM D5262-07.

É importante destacar que os fatores de segurança parciais,  $f_{mr}$ ,  $f_{ss}$ ,  $f_a$ ,  $f_{cr}$ , podem ser calculados pela razão entre o parâmetro característico do geossintético selecionado para ser utilizado no projeto, com o mesmo parâmetro necessária para atender com segurança as solicitações da obra. Em outras análises, ALLEN e BATHURST (1996) avaliam a sinergia de fluência e danos, a fim de verificar se esta combinação gera dados mais confiáveis do que a multiplicação isolada de fatores. MÜLLER e SAATHOFF (2015) destacam o uso de um fator de capacidade de fluxo a longo prazo e avalia que a permeabilidade no geossintético é comprometida.

## 2.4 Geossintéticos

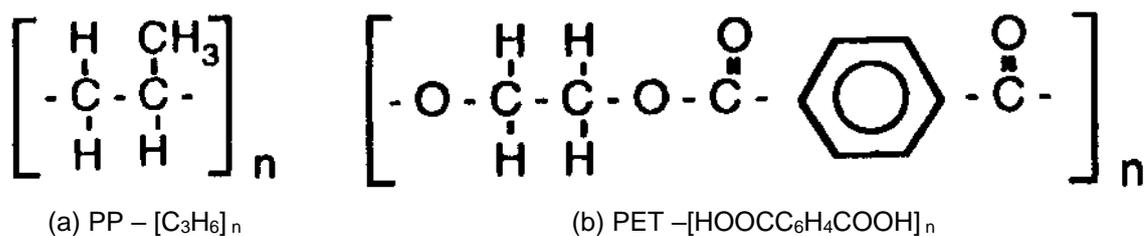
Os geossintéticos ganharam espaço na engenharia para emprego em diversas aplicações. Eles têm a função de tornar os dimensionamentos de projetos economicamente atraentes e proporcionar agilidade na sua execução. Demonstram, portanto, desempenho satisfatório. Sua nomenclatura é uma aglutinação da palavra *geo*, referente à ampla utilização deste material na engenharia geotécnica e *sintético*, devido seu processo de fabricação com a utilização com diversos tipos de polímeros.

### 2.4.1 Materiais Constituintes

Existe uma grande diversidade de polímeros, que são base da fabricação dos geossintéticos que são produtos industrializados, com aplicação na engenharia geotécnica, constituídos por um polímero sintético ou natural. Sua matéria-prima sintética base são principalmente polietileno (PE), polipropileno (PP), poliéster (PET), polietileno de alta densidade (PEAD), policloreto de vinila (PVC) e poliamida (PA).

Os polímeros mais comuns na confecção de FTT são o PP e o PET, sendo que, Fowler (1997), KIM *et al.* (2004), YAN e CHU (2005), OH e SHIN (2006), KOERNER e KOERNER (2006), ALVAREZ *et al.* (2007), SHIN e OH (2007), CHU *et al.* (2011) e KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA (2014) destacam o uso de geotêxteis de elevada permeabilidade e resistência à tração. As Figura 2.13 'a' e 'b' mostram, respectivamente, as estruturas dos monômeros que dão origem ao PP e PET.

Figura 2.13. Unidades de repetição dos principais polímeros em FTT



O PP é um termoplástico com um ponto de fusão de aproximadamente 165°C e uma densidade de aproximadamente 0,90 kg/m<sup>3</sup>, o que o caracteriza como um dos polímeros mais leves. Sua densidade é inferior à densidade da água, o que o permite flutuar. De acordo com CRAWFORD (1998) e RAM (1997), o PP possui longas cadeias moleculares e estrutura semicristalina, o que lhe confere rigidez elevada, boas propriedades de tração e resistência a ácidos, a bases e à maioria dos solventes. Possui baixa resistência à oxidação devido à existência de carbonos terciários em sua cadeia polimérica, que são mais susceptíveis de sofrerem um ataque por parte de radicais livres, com perda de átomos de hidrogênio. Assim, são normalmente adicionados antioxidantes ao PP para prevenir a oxidação durante o processo de fabricação e para melhorar a durabilidade dos materiais. O PP é o polímero mais usado na fabricação de geotêxteis, que chegam à marca de 85% de todos os geotêxteis, segundo KOERNER (2012) e de 65%, de acordo com INGOLD (1994).

O PET é também um termoplástico com um ponto de fusão em torno de 260°C, que é muito maior que o ponto de fusão do PP e com uma densidade de cerca de 1,38, ou seja, mais denso do que a água. Logo, os materiais de PET não flutuam. O PET possui longas cadeias moleculares e estrutura semicristalina, o que lhe confere rigidez elevada, boas propriedades mecânicas e resistência química à maioria dos ácidos e a vários solventes, como descreve CRAWFORD (1998). Este material é utilizado abaixo da sua temperatura de transição vítrea e tende a deformar pouco por fluência. Na presença de água, o grupo éster do PET pode sofrer, muito lentamente, hidrólise. Tal como para o PP, também são normalmente adicionados aditivos químicos ao PET para aumentar a sua durabilidade a longo prazo, já que são muito sensíveis a agentes atmosféricos. O PET é o segundo polímero mais usado para a fabricação de geotêxteis, alcançando a marca de 12% de todos os geotêxteis, segundo KOERNER (2012) e de 30%, de acordo com INGOLD (1994).

### 2.4.2 Classificação dos Geossintéticos

A grande variedade de geossintéticos disponíveis no mercado atualmente (Tabela 2.8) permite que estes materiais possam ser aplicados em diferentes tipos de obras. Vale ressaltar que existem mais nomenclaturas e que são variantes dos nomes apresentados, como por exemplo, os geocompostos, drenantes ou argilosos, e os geotêxteis, tecidos (GTXw) e não-tecidos (GTXn).

**Tabela 2.8: Principais tipos de FTT e suas aplicações**

Nome	Sigla	Simbologia
Geomanta	GBL	
Geocélula	GCE	
Geocomposto	GCD	
Geogrelha	GGR	
Geomanta	GMA	
Geomembrana	GMB	
Geomatriz	GMT	
Georrede	GNT	
Geoespaçador	GSP	
Geotira	GST	
Geotêxtil	GTX	

Existem outros produtos derivados, como por exemplo, a FTT, totalizando 22 tipos de acordo com VERTEMATTI (2015). Especialmente, em obras para contenção de erosão costeira ou de margens de rios, as FTT merecem destaque especial. Estas aplicações permitem o uso de geotêxteis, para soluções permeáveis e geomembranas, para soluções impermeáveis.

### **2.4.3 Ensaios de Caracterização**

Os ensaios de caracterização podem ser divididos em grupos que analisam propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas e desempenho dos geossintéticos em geral. Eles estão expostos na Tabela 2.9, acompanhados das normas nacionais e internacionais. As normas relacionadas são parte da caracterização realizada em geossintéticos. Além destas normas, há outras variações de procedimento de acordo com o tipo de geossintético e suas aplicações específicas. MONTEZ (1995) e GOMES e VIDAL (2002) destacam a importância dos ensaios e, principalmente, da criação de especificações bem definidas em projeto, que permitam a caracterização adequada dos materiais vendidos, ao mesmo tempo em que garantem a qualidade da obra a ser executada. Seguem as principais considerações a respeito de cada ensaio utilizado na caracterização de geotêxteis tecidos usados como FTT.

#### ***Propriedades Físicas***

##### *Gramatura*

É a relação entre massa por unidade de área ( $\mu_A$ ). De acordo com KOERNER (1998), para a maioria dos geotêxteis, os valores de gramatura variam entre 100 e 1000 g/m<sup>2</sup>. Esta característica, bem como a espessura nominal e a porosidade, são consideradas propriedades-índices, que servem para identificar o produto. IGNOLD e MILLER (1988) avaliam a gramatura como uma forma de qualificar a resistência do geossintético, uma vez que eles descrevem estas propriedades com variação linear e crescente. GIROUD (1984) propõe uma análise crítica sobre o tema em seu artigo do primeiro volume da *Geotextile and Geomembranes*.

**Tabela 2.9: Principais ensaios de caracterização em geossintéticos e suas normas**

Propriedades		Norma	
Físicas	Gramatura	NBR ISO 9864, ISO 9864, ASTM D5261	
	Espessura nominal	NBR ISO 9863, ISO 9863, ASTM D5199	
	Porosidade	-	
	Microscopia	-	
	Espectrofotometria	ISO 10640, ASTM D2702 e E169	
Mecânicas	Compressibilidade	NBR ISO 25619, ISO 25619, ASTM D6364	
	Tração	Convencional	NBR ISO 10319, ISO 10319, ASTM D4595
		Faixa restrita	ASTM D4632
		Multidirecional	ASTM D5716
	Punção	Estática	NBR ISO 12236, ISO 12236, ASTM D6241
		Dinâmica	NBR ISO 13433, ISO 13433
	Propagação de rasgo	ASTM D4533	
	Estouro	ASTM D3786	
	Fluência	Tração	NBR 15226, ISO 13431, ASTM D5262
		Compressão	NBR ISO 25619, ISO 25619, ASTM D7361
Hidráulica	Permissividade	NBR ISO 11058, ISO 11058, ASTM D5493	
	Transmissividade	NBR ISO 12958, ISO 12958, ASTM D4716	
	Abertura de Filtração	NBR ISO 12956, ISO 12956, ASTM D4751	
Desempenho	Tração confinada	-	
	Punção confinada	-	
	Fluência confinada	-	
	Resistência	Radiação Ultravioleta	NBR 15380, ISO 16474, ASTM G154/ D4355
		Química	ISO 12960, ASTM D6389
		Biológica	ASTM D1987
		Térmica	-
		Arrancamento	-
		Cisalhamento direto	NBR ISO 12957-1, ISO 12957-1, ASTM D5321
		Plano inclinado	NBR ISO 12957-2, ISO 12957-2
	Abrasão	ISO 13427, ASTM D4886	
	Filtração de longa duração	ASTM D5101	
	Danos de instalação	ASTM D5818	

### *Espessura Nominal*

Esta propriedade é determinada medindo-se as distâncias entre duas placas rígidas, que comprimem o corpo de prova na pressão de 2 kPa ( $t_{GTX}$ ). Esta característica em geotêxteis tecidos tende a não mudar com a diferenciação da pressão aplicada ao material e tem influência direta no comportamento hidráulico, tornando a permeabilidade melhor ou pior de acordo com a aplicação, e mecânico, conferindo a resistência adequada ao projeto.

### *Porosidade*

É a relação entre o volume dos poros e o volume total ( $n_{GTX}$ ). Tem influência direta no comportamento hidráulico do geotêxtil e é determinada pela Equação 3.

$$n_{GTX} = \left( 1 - \frac{\mu_A}{t_{GTX} \cdot \rho_f} \right) \quad [3]$$

$\mu_A$  = gramatura do geotêxtil tecido.

$t_{GTX}$  = espessura do geotêxtil tecido.

$\rho_f$  = massa específica da fibra de geotêxtil tecido.

### *Microscopia*

É uma técnica de grande popularidade para obtenção desde simples imagens de amostras ampliadas até informação computadorizada tridimensional. Equipamentos atuais permitem uma grande definição da imagem mesmo em amostras mais espessas que o plano focal. Qualitativamente é a forma mais rápida de observar mudanças físicas que possam alterar as propriedades nas amostras. O mais comum neste tipo de observação é o surgimento de fendas, fissuras, mudanças na textura, até a presença de sujeira que entra em contato com as amostras quando estão expostas no campo.

## *Espectroscopia*

Métodos baseados na produção e interpretação de seus espectros de emissão ou absorção de radiações eletromagnéticas, para análises em geossintéticos são destacadas regiões do infravermelho e ultravioleta visível.

Pela técnica de espectroscopia de absorção na região do ultravioleta visível é possível conhecer a região do espectro eletromagnético na faixa de 200 a 800 nm, onde ocorrem as transições eletrônicas originadas pela excitação dos elétrons na camada de valência nos polímeros. A absorbância está diretamente ligada à exposição do material a este tipo de radiação no meio ambiente ou induzida em laboratório. Além disso, com o espectro, é possível avaliar quantitativamente a absorção de luz ultravioleta e ou a luz visível, quando a amostra muda de cor.

O infravermelho é mais utilizado na identificação da estrutura molecular com análises realizadas em faixa espectral de 4000 a 500 nm. A resposta de transmitância indica, em cada comprimento de onda, mudança nas ligações devido à fotodegradação. Em filmes poliméricos, é um procedimento muito utilizado, onde monitora-se a banda de carbonila, ligações duplas de carbono e oxigênio, entre 1820 e 1660  $\text{cm}^{-1}$ , em função do tempo de exposição à radiação ultravioleta. PUMA *et al.* (2010), KWON *et al.* (2013), CURCIO *et al.* (2015) e MURAKAMI e KOBA (2016) fazem uso desta técnica para avaliar a formação de carbonila nos polímeros utilizados nesta pesquisa sobre embalagens.

## ***Propriedades Mecânicas***

### *Tração*

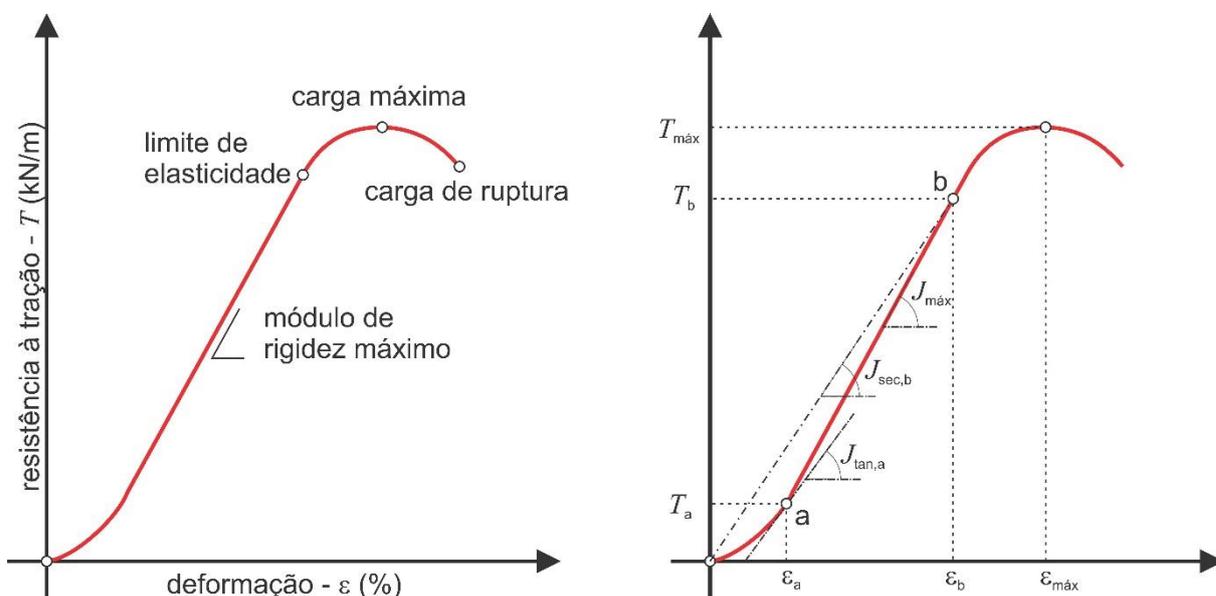
Os geossintéticos são submetidos a esforços de tração. O ensaio de tração é realizado sob deformação controlada até a ruptura do corpo de prova. E, para fixação do corpo de prova no equipamento de ensaio, são utilizadas garras, que podem ser desde modelos por aperto frontal, tipo cunha, pneumática até rolete, por exemplo. O número mínimo de corpos-de-prova utilizados para o ensaio de tração não confinada é de 5. O ambiente de ensaio deve possuir temperatura controlada de  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  e umidade relativa de  $65 \pm 5$ .

Pela norma anterior de ensaio de tração de faixa larga, ABNT NBR 12824, a deformação baseava-se no deslocamento entre as garras, desde que fosse assegurado um sistema de ancoragem que evitasse danos e/ou deslizamentos. Com a sua atualização, ABNT NBR ISO 10319, as medidas de deslocamentos são aferidas por meio de referências marcadas no terço médio dos corpos de prova. Desta maneira, asseguraram-se medidas de deformações reais do geossintético.

A velocidade constante de ensaio é selecionada de modo a garantir uma taxa de deformação de  $20 \pm 5$  % por minuto na distância entre as referências no corpo de prova. As medidas podem ser feitas por meio de um extensômetro em procedimento mecânico, ótico, infravermelho ou de outros tipos, com ou sem saída de dados eletrônica. Estes pontos de referência se situam no eixo de simetria do corpo de prova, paralelo à direção de aplicação da carga, e são separados pela distância de 60 mm, sendo 30 mm de cada lado do centro de simetria do corpo de prova.

Definidas as distancias entre as referências no corpo de prova e, conseqüentemente, a velocidade de ensaio, podem-se iniciar os testes. O ensaio começa com uma pré-carga de 1% da força máxima estimada, para definir o ponto inicial de partida da deformação, e prossegue até a ruptura do corpo de prova. Ao fim do procedimento, pode-se determinar, para caracterização do geossintético, a rigidez secante média, correspondendo deformações de 2, 5 e 10 % (Figura 2.14). A norma vigente não menciona mais a utilização de dados de rigidez tangente média nas deformações de 2, 5 e 10 % e nem a máxima.

**Figura 2.14. Parâmetros da curva do ensaio de resistência à tração**



O comportamento das FTT à tração mostra o quanto é importante caracterizar os geossintéticos que serão utilizados neste tipo de projeto. Por isso, é importante destacar que, a realização deste ensaio, não é só um procedimento normatizado a seguir sem nenhum critério extra. É necessário avaliar os fatores que influenciam a determinação deste parâmetro. A Tabela 2.10 lista trabalhos que caracterizam esta propriedade e tópicos importantes associados ao ensaio de tração direta.

**Tabela 2.10: Trabalhos de resistência à tração**

Referência	Material de Estudo	Observações
ANDRAWES <i>et al.</i> (1984)	GTXn	Avaliou o efeito de temperaturas, da taxa de deformação e confinamento dos materiais estudados
LEFAIVE e PAUTE (1982)	GTXn	Amostras submetidas a ensaios em faixa larga de 500 mm de largura podem apresentar aumentos de resistência de até 20%
CAZZUFFI <i>et al.</i> (1986)	GTXn	Análise entre laboratórios com respostas variando entre 2,2 e 7,0% para a resistência final à tração é reprodutiva
VIDAL e PADILHA (1995)	GTX	Discussão sobre fatores que afetam a resistência à tração dos geossintéticos. Ensaio em fibras, faixa estreita e larga em geossintéticos
CORREIA <i>et al.</i> (2011)	GTXn	Analisou-se o efeito de diferentes temperaturas e da taxa de deformação nos ensaios em geotêxteis não tecidos
DIAS FILHO <i>et al.</i> (2014a)	GTXn	Ensaio com diferentes faixas de larguras do corpo de prova para avaliar a resposta final em diferentes gramaturas do material
KARADEMIR e FROST (2014)	GTX	Tração em filamentos de geotêxtil em polipropileno em temperaturas variando entre 21° e 50° C
DIAS FILHO <i>et al.</i> (2015a)	GTXw	Determinação da tração indireta e deformação obtida com sucesso em suporte CBR com teste em baixa gramatura de geotêxteis tecidos
CORRÊA <i>et al.</i> (2015)	GTXw	Ensaio realizado com garras de aperto frontal, aperto ao redor da amostra, cunha e pneumático, a fim de avaliar os mecanismos de fixação

Segundo CAZZUFFI *et al.* (1986), é possível obter resultados mais precisos, não se esquecendo de analisar os detalhes de cada pesquisa, a fim de avaliar possíveis padrões que afetam a resistência final do geossintético. LEFAIVE e PAUTE (1982) e DIAS FILHO *et al.* (2014a), por exemplo, analisam a resposta da tração direta com variação da faixa de largura dos corpos de prova. No primeiro artigo, são analisados geotêxteis não tecidos e a relação da resistência à tração entre as respostas medidas com 500 mm e 200 mm chegam a mudar em até 40% para gramaturas inferiores a 300 g/m<sup>2</sup>. O segundo apresenta boa correlação de resultados em geotêxteis tecidos com variações dentro do desvio padrão.

VIDAL e PADILHA (1995) propõem uma comparação entre ensaios de faixa larga, faixa estreita e com fibras. Os resultados demonstraram boa previsão da resistência à tração para os materiais em PET, diferentemente dos geotêxteis não tecidos em PP, que mostraram valores superiores. Neste caso, os autores sugerem discussão quanto ao comprimento da fibra e/ou direção de tracionamento, a estrição dos corpos de prova, nível de agulhagem e atrito entre fibras.

KARADEMIR e FROST (2014) apresentam, por sua vez, ensaios em fibras, em equipamento especial, e revelaram resultados com baixa dispersão dos dados. Analisaram também a influência da temperatura durante a execução do ensaio. Os resultados mostram perda de resistência a ordem de 50% em 50° C.

ANDRAWES *et al.* (1984) e CORREIA *et al.* (2011) avaliam a taxa de deformação e temperatura de forma isolada. Pela norma, a taxa utilizada em ensaio é de  $20 \pm 5$  %/min e a temperatura  $20 \pm 2^\circ$  C. Os primeiros autores, ANDRAWES *et al.* (1984), apresentaram ensaios com taxas de deformação de 20, 2 e 0,2 mm/min e temperaturas de 10°, 20° e 30° C. As velocidades abaixo da normatizada exibiram resistências menores de até 12% e 25% aproximadamente, enquanto a temperatura diminuiu a resistência à tração em 10 % nos ensaios de 30° C e apenas diminuiu a deformação em aproximadamente 10% no ensaio em 10° C. CORREIA *et al.* (2011) usa taxa de 20 %/min e 10 %/min, a qual se refere à Norma Brasileira antiga, e temperaturas de 21°, 50° e 70° C. Resumidamente, observou-se que, as menores taxas de deformação nos ensaios aquecidos promoveram maiores valores de resistência a ruptura e deformação.

As normas atuais aconselham a utilização de garras compressivas para a maior parte dos materiais, entretanto, para os produtos nos quais o uso destas garras implica em excessivo escorregamento ou ruptura, garras cilíndricas do tipo rolete podem ser usadas. De acordo com os resultados de FRANÇA (2014), as garras do tipo rolete permitiram a fixação do corpo de prova com maior segurança em relação ao deslizamento relativo garra-corpo de prova e BUENO *et al.* (2007) caracterizaram uma deformação média de ruptura de 53,6% adotando a subida da garra como referência, enquanto esse valor foi de 13,4% utilizando um sensor ótico. Isso representa uma redução de cerca de 75%. Já a avaliação da ruptura, a diferença entre o sistema convencional de garras por aperto frontal e a rolete, houve diferença de 20% entre os valores médios obtidos nos ensaios de geotêxtil tecido de baixa gramatura. As garras do tipo rolete seriam, no geral, a melhor opção junto a um sistema de medição externa.

Nesta tese, junto a experimentos paralelos, desenvolveram-se alguns artigos que avaliam isso. DIAS FILHO *et al.* (2014a) trabalharam com geotêxteis tecidos com gramaturas inferiores a 300g/m<sup>2</sup> apresentando resultados de tensão e deformação com valores dentro da média de catálogo do fabricante com a garra de aperto a redor da amostra. De acordo com os resultados de BUENO *et al.* (2007), PINTO (2006) e DIAS FILHO *et al.* (2014a), a garra por aperto ao redor da amostra seria uma alternativa tão boa quanto a garra de rolete. Nessa garra o corpo de provas não possui comprimento inicial pré-determinado. Nos ensaios com esse tipo de garra observa-se que ocorre o deslocamento relativo entre os roletes e o geossintético. Isso é necessário para que ocorra o autotravamento do geossintético na garra. Dessa maneira, faz-se necessário um medidor de deformação externo, não podendo utilizar o deslocamento relativo entre as duas garras como parâmetro para a obtenção da deformação do geossintético, como acontece no caso das garras por aperto.

Em estudo publicado por DIAS FILHO *et al.* (2014b), DIAS FILHO *et al.* (2015a) e CORRÊA *et al.* (2015), com o material desta tese, foram observadas diferenças nos ensaios de acordo com a gramatura do geossintético e com garra por aperto ao redor da amostra. Há escorregamento para avaliação de geotêxteis tecidos com gramaturas de até a 500g/m<sup>2</sup> e, acima deste valor, escorregamento e ruptura por danos mecânicos gerados pelo aperto excessivo.

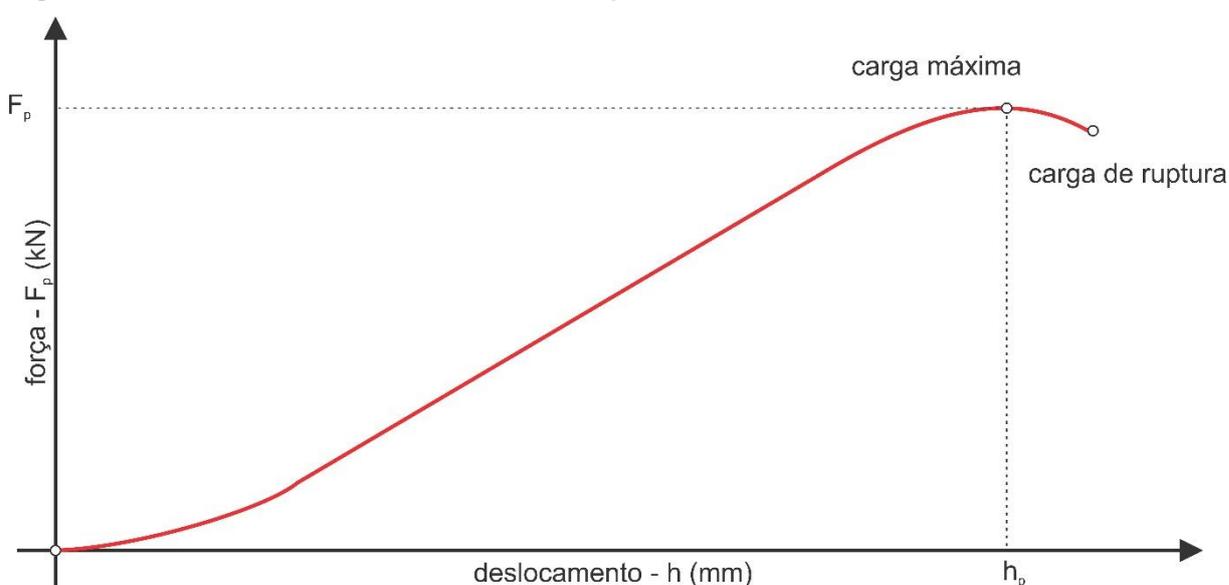
CORRÊA *et al.* (2015) avaliam diferentes tipos de garra de fixação. Foram realizados ensaios com garras de aperto frontal, aperto ao redor da amostra, cunha e pneumático. Cada modelo foi apresentado apontando suas principais características com uma análise de resultados. Já DIAS FILHO *et al.* (2015a) sugere uma alternativa aos ensaios tradicionais para avaliação da resistência à tração com o uso do suporte de ensaio CBR, utilizado em ensaios de puncionamento. Neste procedimento, foi utilizada uma faixa estreita na linha central do suporte e a aplicação de força foi por meio da própria célula de carga de 5 cm de largura, a qual promovia contato e tornava as considerações de tensão e deformação similares aos autores CAZZUFFI *et al.* (1986), quando propuseram a tração indireta no ensaio de puncionamento. A diferença, por sua vez, é a geometria do ensaio. DIAS FILHO *et al.* (2015a) observaram a curvatura típica nos corpos de prova se enquadram na metodologia de CAZZUFFI *et al.* (1986). Sendo assim, esse ensaio mostrou-se uma alternativa melhor para determinação das deformações nos geossintéticos quando comparado ao ensaio de puncionamento estático, que apresentam curvatura.

## Puncionamento

A punção, no geossintético, é importante para diversas aplicações. Na maioria delas, o material está sujeito a cargas perpendiculares ao seu plano de fabricação, normalmente causada por enrocamento de alguma camada de material lançado sobre ou que estejam sob o material, reconfigurando as tensões no plano de trabalho daquele geossintético. As distribuições destas tensões e sua magnitude podem causar falhas com a perfuração do material em projeto. Os geotêxteis tecidos, aplicados em obras hidráulicas na forma de FTT, além da perfuração com o material proveniente do dimensionamento projeto, podem também sofrer com o vandalismo. Esta ação antrópica é ocasionada por elementos perfurantes, como barras ou até mesmo facas, que perfuram o geossintético e podem causar danos irreparáveis. Quando o problema não pode ser reparado por uma nova costura sobreposta à área danificada, será inevitável uma substituição total da FTT na obra.

O ensaio é realizado com deslocamento controlado até a ruptura do corpo de prova com velocidade de  $50 \pm 5$  mm/min e pré-carga de 20 N. E, para fixação do geossintético no equipamento de ensaio, são utilizadas garras em suporte estrutural ou molde CBR. O número mínimo de corpos de prova é de cinco. O ambiente de ensaio deve possuir temperatura controlada de  $20 \pm 2^\circ$  C e umidade relativa de  $65 \pm 5$ . A curva típica do ensaio está representada na Figura 2.15.

**Figura 2.15. Parâmetros da curva do ensaio de puncionamento**



A Tabela 2.11 exibe trabalhos que caracterizam esta propriedade. São avaliações do ensaio que permitiram, por exemplo, determinar a tração de forma indireta nos geossintéticos ensaiados por puncionamento com CAZZUFFI *et al.* (1986), MURPHY e KOERNER (1988), GOSH (1998), DIAS FILHO *et al.* (2014b) e DIAS FILHO *et al.* (2015a). Foi observado como a propriedade de gramatura e os tipos de geossintético influenciam nas respostas dos ensaios. Os trabalhos apresentam equações que permitem obter a tração de forma indireta (Figura 2.16a). Os melhores resultados são obtidos em geomembranas, seguidos de geotêxteis tecidos e não tecidos de baixa gramatura.

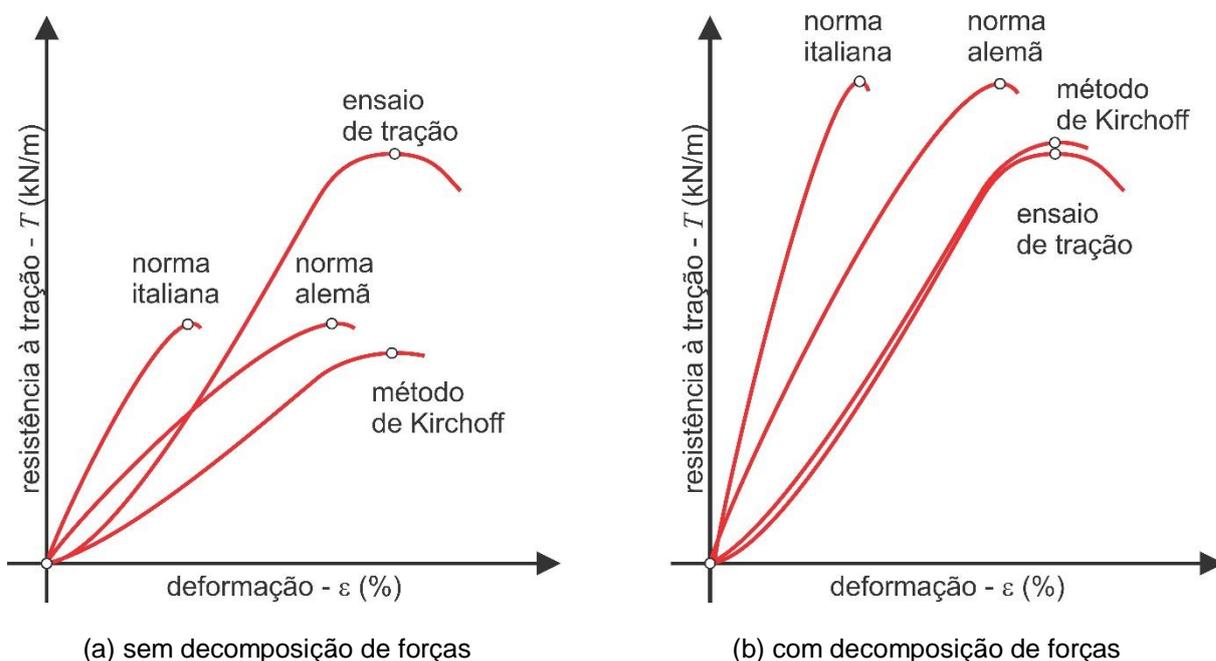
As dificuldades de interpretações em torno do ensaio de puncionamento, como forma de obter a resistência à tração, ainda geram dúvidas por se tratar de um ensaio bem diferente da convencional tração simples, em que as forças envolvidas e deslocamentos não estão na mesma direção. BERGADO *et al.* (2001) e Atmatzidis (2006), por exemplo, levam em consideração a inclinação do geotêxtil ao longo do carregamento e, conseqüentemente, a tensão gerada por meio da decomposição da força aplicada na direção do geossintético puncionado. É observado que a análise se mostrou a melhor forma de obter melhor este parâmetro de tensão, mas as deformações ainda são o grande problema a ser interpretado, apresentando resultados 50% menores. Este trabalho propõe um modelo que pode ser uma solução. Apresenta uma comparação das tradicionais análises de deformação Alemã e Italiana com o Método de Kirchhoff, que mostrou uma resposta mais próxima à realidade do ensaio que desenvolve uma curvatura ao longo do deslocamento do pistão. A Figura 2.16b ilustra esta abordagem, que se revela como a melhor evolução deste procedimento no meio acadêmico e com a melhor correlação dos resultados com o ensaio de tração direta, corrigindo também as tensões através da decomposição das forças na direção do geossintético.

Outros parâmetros importantes observados durante os procedimentos merecem destaque. Assegurar a melhor forma de fixação dos corpos de prova no suporte CBR, com as gramaturas cada vez maiores nos geossintéticos é questão abordada por HSIEH e WANG (2008). Além de apresentar um sistema pneumático, para fixação dos corpos de prova utilizados no ensaio de puncionamento estático, os autores avaliaram o ganho de produtividade no processo que envolve a execução do ensaio, que pode aumentar em até 15 vezes.

**Tabela 2.11: Trabalhos de puncionamento.**

Referências	Material de Estudo	Observação
CAZZUFFI e VENESIA (1986); MURPHY e KOERNER (1988), DIAS FILHO <i>et al.</i> (2014b)	GTX GMB GNT GCD	Boa correlação entre a resistência à tração indireta no puncionamento CBR com a resistência à tração direta obtida no ensaio de tração em faixa larga.
WILSON-F <i>et al.</i> (1996); NAREJO <i>et al.</i> (1996) e KOERNER <i>et al.</i> (1996)	GMB	Teoria e prática utilizadas na Alemanha e Estados Unidos para a seleção de geotêxteis de proteção para as geomembranas.
GHOSH (1998)	GTX	Observa-se menor resistência à tração indireta em ensaios de puncionamento em comparação com os valores medidos no ensaio de tração direta.
BERGADO <i>et al.</i> (2001)	GTXn	Apresenta uma forma para cálculo da resistência à tração indireta levando em consideração o ângulo formado entre o pistão e o corpo de prova.
NGUYEN <i>et al.</i> (2004)	GMB	Investigação da influência da geometria e dimensão do pistão no ensaio de puncionamento. Apresenta uma forma de cálculo das tensões e deformações
ATMATZIDIS <i>et al.</i> (2006)	GTXn	Boa correlação entre a resistência ao puncionamento, índice de resistência à perfuração, resistência ao rasgo e resistência à tração.
HSIEH e WANG (2008)	GTXw	Ensaio com aperto hidráulico apresentando um deslocamento 3 vezes menor e uma resistência 8 vezes maior que aperto tradicional
MARCOTTE <i>et al.</i> (2009)	GMB	A abrasão de materiais granulares é o fator que influencia a resistência à perfuração.
KOERNER <i>et al.</i> (2010)	GMB GTXn	Uso de geotêxteis não tecido como proteção contra furos em geomembranas
BOLT e DUSZYNSKA (2010)	GTXn	Geotêxteis recuperado a partir da construção do solo apresentam menor resistência à perfuração
KOERNER e KOERNER (2011)	GTXn	Geotêxteis não-tecidos de PP apresentaram resistência maior que os de PET em todas as gramaturas analisadas
TAFFE JUNIOR <i>et al.</i> (2002); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2015b); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2016c)	GTX	Aumento da resistência do conjunto solo-geossintético a partir de ensaios de puncionamento
RAWAL <i>et al.</i> (2013)	GTXn	Apresenta uma forma alternativa para calcular a carga de ruptura no ensaio de puncionamento.
SILVA <i>et al.</i> (2014)	GTXw	Punção por lançamento de material de proteção sobre o geossintético em obras
KENDAL <i>et al.</i> (2014)	GTXn	Punção em grande escala para caracterização de obras com impacto de rochas em geotêxtil
PRELLWITZ <i>et al.</i> (2014)	GTXw	Punção em escala reduzida e procedimento de degradação por saturação e secagem

Figura 2.16. Ensaio de tração indireta através do puncionamento por diferentes técnicas



Técnicas considerando condições de campo em que o material pode ser perfurado na obra são sugeridas por TAFTE *et al.* (2002), que analisou material argiloso compactado no suporte CBR em 4 condições de umidade. Foram observados aumento da capacidade suporte com a umidade próximo a ótima e a atuação do geotêxtil como reforço. Este ensaio foi denominado pelos autores de puncionamento com solo e geotêxtil. DIAS FILHO *et al.* (2015b e 2016c) apresentam ensaios em areia em 4 densidades, simulando possíveis condições de perfuração de FTT, o que aumenta a resposta de resistência e a diminuição das deformações. Considerando as características do ensaio e sua aplicação, a qual sugere a perfuração do geossintético com resistência de areia na face oposta do material em contato com o pistão CBR, estes autores denominaram o ensaio de punção confinada.

KENDAL *et al.* (2014) apresentam um ensaio em grande escala, o maior realizado até hoje, e PRELLWITZ *et al.* (2014), um ensaio em escala reduzida. KENDAL *et al.* (2014) destacam a necessidade de avaliar o real desempenho do material em sua simulação e PRELLWITZ *et al.* (2014) usam a escala reduzida como uma alternativa para analisar a durabilidade de geotêxteis, em diversos níveis de degradação, o que gera uma demanda de material grande. Já KOERNER e KOERNER (2011) revelam resultados com os diversos pistões normatizados e uma excelente correlação entre os dados. BERGADO *et al.* (2001) avaliam, ainda, diferentes velocidades durante o ensaio e o resultado causa pouca dispersão.

## *Fluência*

A fluência é a deformação que ocorre a um material que está submetido a carregamento constante. Este ensaio é muito importante para caracterizar a durabilidade do geossintético, uma vez que, os resultados obtidos por ele podem estimar o tempo de vida útil daquele material em projeto. Como os projetos que envolvem a utilização de geossintético almejam tempo de serviço mais longo, é razoável caracterizar o material quanto a esta propriedade.

O princípio deste ensaio é aplicar uma carga constante a um corpo de prova do ensaio de tração não confinada. Existem duas variantes que envolvem a execução dos testes de fluência: a determinação do comportamento da deformação por fluência ou determinação da carga de ruptura por fluência. São definidos, então, 4 níveis de carga que tracionam os 4 corpos de prova que compõem o ensaio. Caso se decida pela primeira variante dos testes, a deformação na fluência, utilizam-se as cargas variando entre 5% e 60%. Optando-se pela segunda variante, a ruptura, têm-se 50% a 90% da carga de ruptura do ensaio de tração.

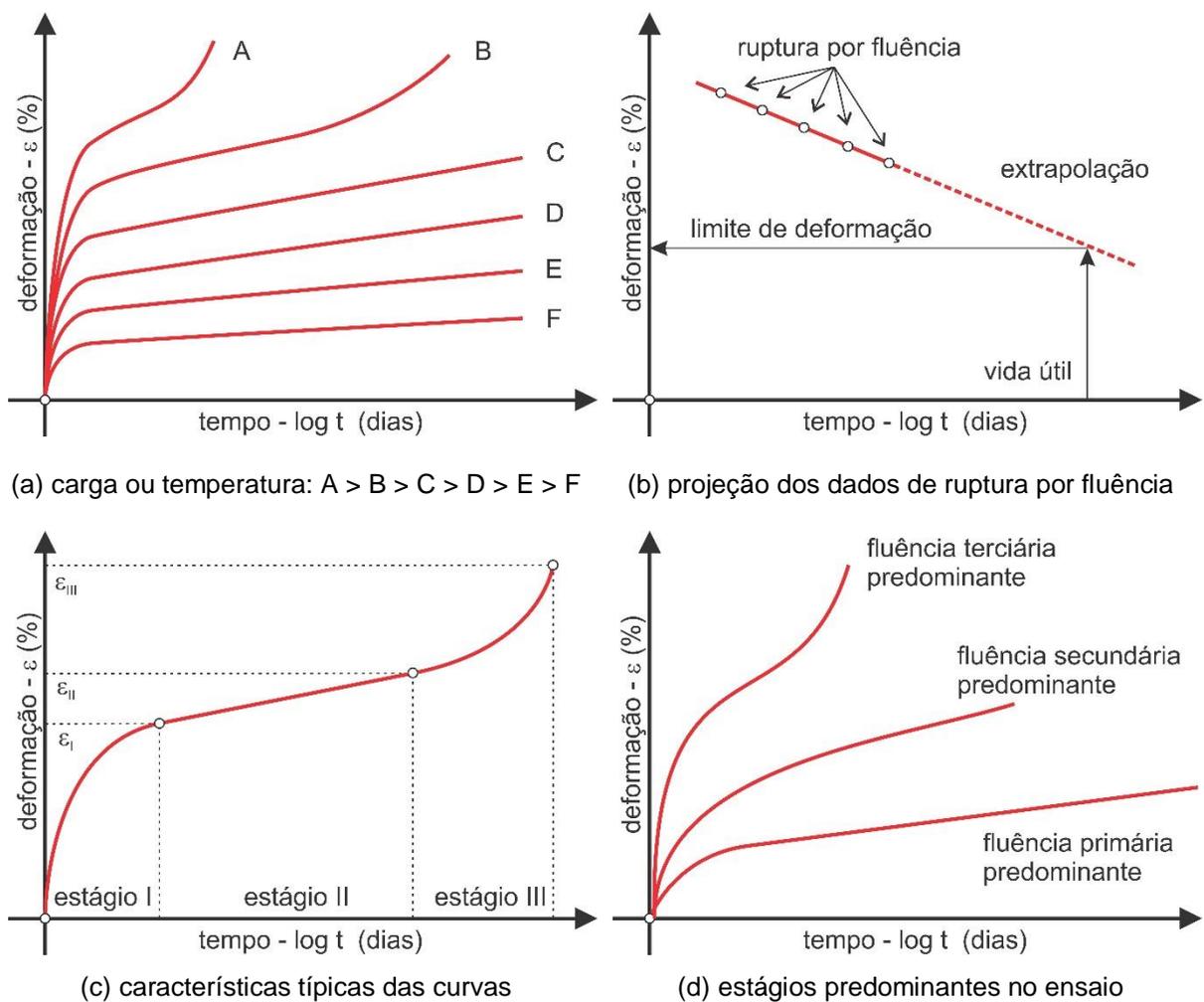
Com as cargas dos ensaios definidas, realizam-se os testes. Observa-se que a solicitação de tração desejada deve ser atingida em 60 segundos e o ambiente de ensaio deve possuir temperatura controlada de  $20 \pm 2^\circ \text{C}$  e umidade relativa de  $65 \pm 5 \%$ . Realizam-se as medições dos deslocamentos nos corpos de prova com os tempos predeterminados de 1, 2, 4, 8, 15, 30 e 60 minutos, depois 2, 4, 8 e 24 horas e em 3, 7, 14, 21 e 48 dias, o que totalizam 1008h de ensaio. O ensaio pode continuar com medições em até 10000 h. O resultado final apresenta os dados de deformação ou ruptura por fluência, que podem auxiliar na análise do comportamento do geossintético a longo prazo, ou seja, sua durabilidade. A caracterização dos ensaios é apresentada na Figura 2.17 a e b.

A fluência pode ocorrer também por compressão. É uma propriedade importante, considerando que esta solicitação pode diminuir a espessura dos geossintéticos e, conseqüentemente, eles perderem suas propriedades hidráulicas, podendo até causar ruptura da estrutura do geossintético.

Uma variante inédita deste estudo é a fluência através do ensaio de punção. Este, por sua vez, não diferentemente dos métodos anteriores, se propõe seguir os mesmos procedimentos do ensaio padrão.

O comportamento da fluência é dividido em três estágios de deformação. O estágio primário antecede o momento em que a relação tempo e deformações tornam-se constantes do segundo estágio. As deformações, neste momento, compreendem o carregamento do geossintético mais a resposta por fluência. No segundo estágio, prevalece a linearidade da curva, enquanto que o terceiro estágio é caracterizado por um aumento de deformações que ocasiona a ruptura do material em um curto período de tempo (ver Figura 2.17 c e d). COSTANZI *et al.* (2003), GUO *et al.* (2005) e BUENO *et al.* (2005) propõem maneiras de interpretar as curvas apresentando equações logarítmicas que permitem extrapolações dos dados obtidos em laboratório, a fim de determinar os padrões de interesse, como por exemplo, a taxa de deformação por fluência em temperaturas diferentes até a resistência limite pelas deformações ocasionadas na fluência. A Tabela 2.12 exhibe alguns trabalhos de fluência não confinada e a Figura 2.18, o maior teste já realizado.

**Figura 2.17. Curvas típicas obtidas dos ensaios de fluência**



**Tabela 2.12: Trabalhos de fluência não confinada**

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
PERKINS (2000)	GGR GTX	Carga	Apresentou modelos constitutivos para os materiais da pesquisa
PAULA <i>et al.</i> (2008)	GGR GTX	Carga	Foram analisados os materiais com e sem danos de instalação para determinar coeficientes de redução
ZANZINGER e SAATHOFF (2012)	GMB	Carga	Estima-se tempo de vida de 100 anos usando a extrapolação da linha de regressão de tempos
BERNARDI e LOSTUMBO (2015)	GGR	Carga	Análise dos fatores de redução para ensaios de fluência com limite de deformação e na ruptura

**Figura 2.18. Maior ensaio de fluência realizado em geossintético**



(a) estrutura do ensaio

(b) geotêxtil sob fluência

(c) detalhe da carga aplicada

Os trabalhos por fluência já se consolidaram na literatura técnica com o amplo estudo desenvolvido desde os primeiros trabalhos na década de 70 até hoje. Pesquisas atuais aceleram estes ensaios junto a processos de degradação e/ou confinam o material sob condições especiais, unindo uma reposta mecânica de ensaio em condições aceleradas ou em desempenho. A Tabela 2.13 apresenta trabalhos sobre ensaios de fluência utilizando procedimentos especiais. Desses trabalhos destacam-se os ensaios de fluência acelerada utilizados para determinação mais expedita do comportamento a longo prazo do material. Muitos ensaios já consideram as condições de campo. Sendo assim, é possível definir melhor os critérios de dimensionamento de acordo com a análise sugerida pelos autores descritos na tabela.

**Tabela 2.13: Trabalhos de fluência com procedimentos especiais**

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
COSTA (1999)	GTXn	Carga	Criação de um equipamento para estudar o comportamento da fluência confinada em solos
COSTANZI <i>et al.</i> (2003)	GTXn	SIM <sup>1</sup>	Os resultados indicam que os ensaios acelerados simulam o fenômeno da fluência com boa precisão
GUO <i>et al.</i> (2005)	GGR	Carga e temperatura	A extrapolação dos dados permitiu análise da deformação limite e tempo de serviço do material
BUENO <i>et al.</i> (2005)	GTXn	SIM <sup>1</sup>	Os resultados experimentais indicam que os ensaios de fluência acelerada podem caracterizar com precisão os materiais estudados
KAMIJI (2006)	GTXn	Confinada	A gramatura não influenciou significativamente nos resultados experimentais de acordo com interação solo-geotêxtil
JONES e CLARKE (2007)	GGR	SIM <sup>1</sup>	Os resultados indicam durabilidade de 120 anos para ensaios com carga de 40% da ruptura
KONGKITKUL <i>et al.</i> (2007)	GGR	Temperatura	Análise da resistência à tração de projeto através da curva de ruptura de fluência em degradação
KOERNER <i>et al.</i> (2010)	GMB	Câmara de pressão	A análise por 10 anos tornou possível revisar os fatores de redução
YEO <i>et al.</i> (2010)	GGR	SIM <sup>1</sup>	Estima-se tempo de vida de 100 anos com base de dados de 10 h de fluência
FRANÇA e BUENO (2011), FRANÇA <i>et al.</i> (2011 e (2014)	GTXn	Temperatura	O efeito do confinamento do solo na fluência dos geossintéticos, além do uso de temperaturas elevadas para acelerar o processo. Houve aumento na rigidez do material e as curvas ficaram coincidentes
JIN e JOUN (2014)	GGR	SIM <sup>1</sup>	Os fatores de redução não variaram
AVESANI <i>et al.</i> (2013)	GTXn GGR	Confinada	Influência do confinamento em solo nas deformações não foi significativa com a variação de temperatura
LEE <i>et al.</i> (2014a)	GCD	SIM <sup>1</sup>	O fator de redução diminuiu com a fluência acelerada em projeções de 50 e 100 anos
GUIMARÃES <i>et al.</i> (2015)	GTXw	Agentes Climáticos	Observou-se a degradação por fluência e agentes climáticos. A perda de resistência aumentou, em relação ao material intacto, entre 24 e 29%.
BECKER e NUNES (2015)	GTXn	Confinada	Comparação de fluência confinada no campo e com os resultados de testes em laboratório
MOUNES <i>et al.</i> (2016)	GGR	Confinada	Devem-se avaliar as dimensões da geogrelha para comparar os resultados na fluência confinada
DIAS FILHO <i>et al.</i> (2016a)	GTXw	Carga	Apresentação dos ensaios de fluência no punctionamento com boa correlação

<sup>1</sup>SIM – *Stepped Isothermal Method*

## ***Propriedades Hidráulicas***

### *Permissividade*

A permissividade é expressa pela relação entre o coeficiente de permeabilidade do geossintético e sua espessura. Esta análise leva em conta o fluxo no plano normal e pode ser avaliada com técnicas de carga constante e variável. KOERNER *et al.* (1984) descrevem, em seu estudo, dados de permissividade que diminuem com o acréscimo da tensão de confinamento do geossintético aplicado em obra e, também, com a sobreposição de camadas de geossintéticos. De acordo com VIDAL e RIGHETTI (1990), a permissividade é raramente um fator limitante no dimensionamento de geossintéticos, já que sua escolha é feita, normalmente, através do ensaio de abertura de filtração.

### *Transmissividade*

Esta propriedade avalia a permeabilidade do geossintético por fluxo planar, produto entre a permeabilidade no plano e sua espessura. É importante destacar que carga sob o geossintético pode alterar esta característica, como destacado por KOERNER (2012), que apresenta dados obtidos com carregamento estático, e RIMOLD *et al.* (2014), com resultados sob carregamento dinâmico. Os autores observam diminuição da transmissividade sob pressões elevadas na ordem de 500 kPa, com gradientes hidráulicos acima de 0,5 e, quando o carregamento é dinâmico, este valor também decresce. Segundo KOERNER *et al.* (1984), GIROUD *et al.* (2000) e CASTELO e GUTIERREZ (2014), sobreposição de camadas, espessura e compressibilidade dos geossintéticos afetam de forma significativa a mudança desta propriedade de acordo com os projetos.

### *Abertura de Filtração*

Abertura de filtração, ou  $O_{90}$ , refere-se ao diâmetro equivalente a 90% da porcentagem de partículas de solo que pode atravessar o geossintético. Esse valor é determinado por peneiramento úmido. Fisicamente, essa abertura representa o menor diâmetro de partícula que o geossintético pode reter.

HEERTEN (2014) apresenta diversas considerações sobre geossintéticos utilizados em obras hidráulicas, devendo-se considerar, no dimensionamento, um limite de abertura dos poros do geossintético e sua espessura. Deve-se, ainda, assegurar uma instalação adequada do produto para que se evitem danos e faça ser utilizado elevado fator de segurança. De acordo com LEE e DOUGLAS (2012), em geotêxtil tecido de polipropileno, o tamanho efetivo dos poros é normalmente inferior a 180  $\mu\text{m}$  para reter a areia de preenchimento. E, como descrevem WU *et al.* (2008) e TANG *et al.* (2013), este valor pode aumentar de acordo com a solicitação do geossintético em projeto, uma vez que o aumento de tensões gera deformações que causam abertura dos poros. PINHO-LOPES e LOPES (2014) destacam também alteração das propriedades hidráulicas por danos mecânicos e abrasão.

### *Abertura Aparente*

A abertura aparente é um ensaio equivalente ao da abertura de filtração, porém conduzido com peneiramento seco e utilizando esferas de vidro com faixas de diâmetro selecionadas, no geral entre 0,075 e 2,00 mm. BUENO (2003) descreve este ensaio como deficiente, já que há retenção de esferas no corpo do geotêxtil ao longo dos peneiramentos efetuados e há atração eletrostática entre eles, o que certamente é mais acentuado do que no peneiramento hidrodinâmico.

## ***Propriedades de Desempenho***

### *Punção Confinada*

Sabendo que os geossintéticos, normalmente, se encontram confinados na prática, os resultados de laboratório da resistência à tração são inferiores ao observado no campo. ANDRAWES *et al.* (1984) e MASSIMINO (2014) realizam estes ensaios apresentando resultados que concordam com a afirmação. Foram avaliados também o aumento da temperatura na câmara de confinamento e este procedimento gerou perda de resistência com a degradação. Nestes ensaios, o geossintético faz interface com o solo nos dois lados. Diferentemente de como ocorre em FTT, que possui apenas um face em contato com solo.

Uma forma de solicitação do geossintético e com a presença de confinamento do solo pode ser simulada com a punção confinada. Os resultados de laboratório da resistência ao puncionamento também são inferiores ao observado no campo, onde o solo aumenta a resistência do conjunto e diminui as deformações. TAFFE *et al.* (2002) e DIAS FILHO *et al.* (2015b e 2016c) realizam estes ensaios como uma possibilidade de analisar o que realmente acontece com material sujeito à perfuração no campo. BRACHMAN e GUDINA (2008) e BRACHMAN e SABIR (2010) apresentam ensaios com análise da perfuração por britas na superfície de geomembranas.

### *Radiação Ultravioleta*

A exposição à luz solar é um dos mecanismos de degradação que mais promovem alteração dos geossintéticos. Esta radiação, um dos tipos de agente de alteração física, depende diretamente da intensidade e do tempo de exposição. A melhor maneira de minimizar este efeito é evitando a exposição às intempéries ou buscando materiais com aditivos, que permitam a incidência solar por tempo prolongado sem grandes problemas no desempenho do geossintético.

### *Química*

A degradação química pode ser provocada por diversos agentes de alteração como, por exemplo, íons metálicos, oxigênio, água, ácidos, bases e solventes. A principal consequência da exposição dos geossintéticos aos agentes químicos é a modificação na estrutura molecular dos polímeros e consequentemente a alteração de seu comportamento, especialmente em sua durabilidade.

### *Biológica*

A degradação biológica é rara e ocorre normalmente, de forma indireta, por meio dos subprodutos dos micro-organismos gerando gases, criando variações de temperatura e elementos químicos que reagem com os polímeros, como destaca GAMSKY (GAMSKI, 1984). KOERNER *et al.* (1988) a descrevem como o tipo de degradação que menos afeta a durabilidade de geossintéticos.

O efeito mais importante devido a degradação biológica nos geossintético é a colmatação. PRADO e GARDONI (2010) mostram como o processo de colmatação ocorrem nesses casos. As propriedades hidráulicas são afetadas e podem comprometer a eficiência dos projetos. ALVAREZ *et al.* (2007) e SHIN e OH (2007) descrevem os efeitos gerados pelos micro-organismos, em aplicações em FTT, como benéficos. Nestes casos, pouca foi a interferência nos parâmetros hidráulicos e observou-se que a camada biológica gerada em torno do geossintético promoveu proteção ultravioleta.

### Térmica

A temperatura acelera as reações químicas dos polímeros. O tipo do polímero base e a concentração de oxigênio no ambiente podem influenciar significativamente a degradação do geossintético. Os ensaios mais comuns avaliam a sinergia entre oxigênio e temperatura. Equipamentos de termo oxidação são tão comuns quanto os de exposição à radiação ultravioleta. Logicamente as FTT submersas são menos afetadas por estes mecanismos de degradação.

### Danos de Instalação

Toda obra em geossintético requer cuidados com o manuseio deste material. Observa-se que, no dimensionamento, os fatores de segurança minoram a resistência final deste material devido ao baixo controle de qualidade na execução da instalação. Quando há recursos disponíveis ou a obra exige mais cuidados com furos, é possível identificar estes problemas com equipamentos sofisticados antes da liberação do projeto. Caso contrário, realiza-se uma análise visual da superfície do material.

## **2.5 Durabilidade dos Geossintéticos**

Desde os primeiros projetos na década de 50 até os dias atuais, poucos são os trabalhos que apresentam dúvidas do comportamento do geossintético quanto a sua durabilidade. Pode-se dizer que os principais problemas nas FTT ocorrem, primeiramente, por danos mecânicos e abrasão. A Figura 2.19 ilustra ocorrências gerais de problemas em FTT.

LESHCHINSKY *et al.* (1996) apresentam, na Figura 2.19 'a' e 'b', ruptura na costura de um FTT na cidade de Mobile, no Alabama, e KUNZ *et al.* (2014) detalham os canais navegáveis de Midland, na Alemanha, que sofreram intervenções e que, na seca, observaram-se deslocamento das FTT (Figura 2.19c). O caso mais grave foi encontrado nas camadas da superfície do canal, com presença de danos mais severos (Figura 2.19d). As Figura 2.19 'e' e 'f' de ALVAREZ *et al.* (2007) e SHIN e OH (2007) exibem um efeito típico de longa duração em quebra-mares com a presença de algas marinhas. Nas Figura 2.19 'g' e 'h', BRUSCAS (2015) cita danos em FTT na costa de Ocean Shore, na Califórnia, que sofre com os impactos causados pelo grande número de surfistas que frequentam a praia e as fortes tempestades.

**Figura 2.19. Ocorrências gerais de problemas em FTT**



(a) Ruptura local – vista geral<sup>1</sup>



(b) Ruptura local – detalhe<sup>1</sup>



(c) Deslocamento<sup>2</sup>



(d) Danificação<sup>2</sup>



(e) Algas marinhas - México<sup>3</sup>



(f) Algas marinhas - Korea<sup>4</sup>



(g) Dano mecânico local – vista geral<sup>5</sup>



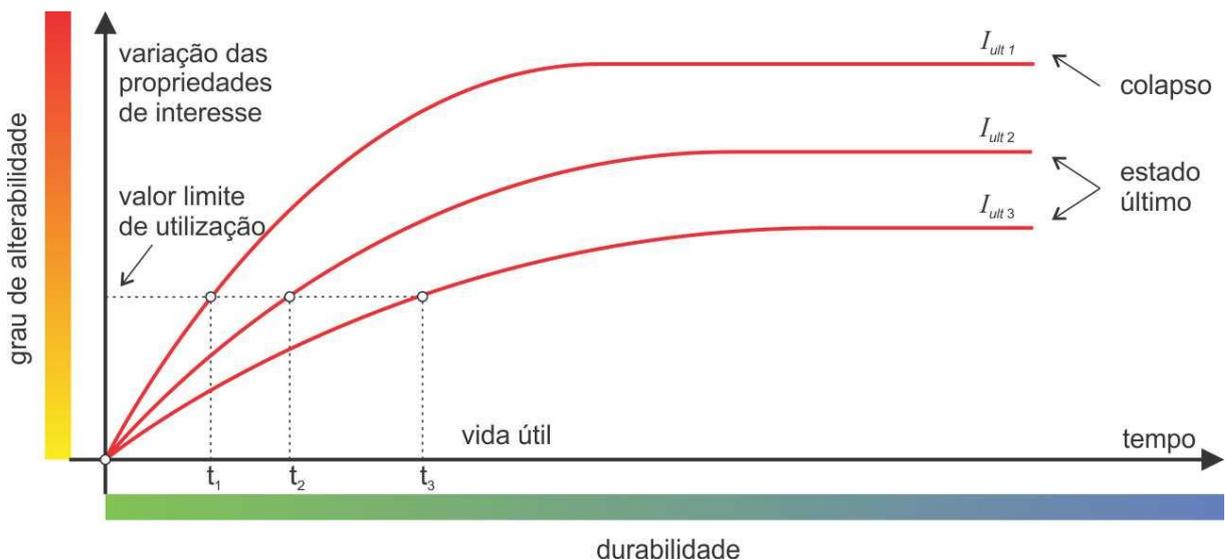
(h) Dano mecânico local – detalhe<sup>5</sup>

Fontes: <sup>1</sup>LESHCHINSKY *et al.* (1996); <sup>2</sup>KUNZ *et al.* (2014); <sup>3</sup>ALVAREZ *et al.* (2007); <sup>4</sup>SHIN e OH (2007) e <sup>5</sup>BRUSCAS (2015)

### 2.5.1 Conceitos Fundamentais

A durabilidade do geossintético é a sua capacidade de manter suas propriedades ao longo da sua vida útil. Os agentes exógenos, por sua vez, promovem a degradação dos materiais e sua resposta aos mecanismos de degradação caracteriza sua alterabilidade. A Figura 2.20 ilustra este conceito.

**Figura 2.20. Caracterização da variação das propriedades do geossintéticos com o tempo considerando a influência do grau de alterabilidade na durabilidade dos materiais**



A durabilidade, então, está relacionada ao tempo de uso do material onde se atinge o valor a propriedade de interesse que define uma condição aceitável de obra: estado limite de utilização. Essa propriedade está relacionada também à condição em que existe o colapso do material: estado último. A degradação. Representa a situação pela qual os geossintéticos sofrem alteração ao longo do tempo: variação das propriedades de interesse. E a alterabilidade está relacionada à facilidade com que ocorre a degradação do material: susceptibilidade de degradação.

### 2.5.2 Degradação em Geossintéticos

Apesar das características da matéria prima, normalmente não degradáveis em curto prazo, é possível que os geossintéticos estejam sujeitos à alteração rápida, principalmente em obras cujas características do meio são agressivas, como os aterros sanitários, as barragens de rejeitos industriais e os sistemas de contenção de

erosão costeira e de rios, como as FTT. A degradação dos geossintéticos pode ser entendida como qualquer ação destrutiva dos polímeros causada por agentes físicos, químicos e biológicos (MATHEUS, 2002). Destaca-se que a degradação provoca uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, evidenciada pela deterioração progressiva das suas propriedades, incluindo o seu aspecto visual.

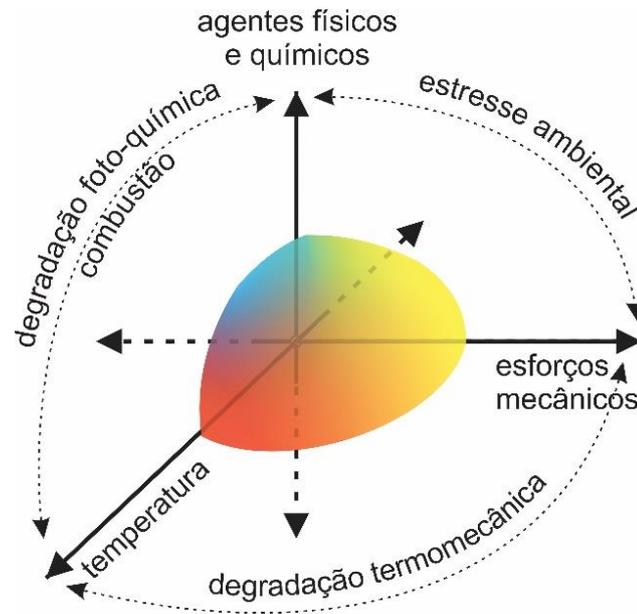
A literatura pouco informa sobre a degradação dos geossintéticos em obras civis, no entanto, RAYMOND (1999) apresenta um estudo mostrando as variações do comportamento de geossintéticos com o tempo. Para isto, este autor estuda as propriedades de amostras exumadas com diferentes intervalos de tempo, indicando que a alteração do material pode provocar até mesmo a ruptura dos geossintéticos em obra. Segundo ABRAMENTO (1995a e 1995b), pode-se avaliar a durabilidade dos geossintéticos em obras civis através de exumação do material para a avaliação do seu desempenho após a utilização, simulações em laboratório e métodos de avaliação da durabilidade.

A degradação de um geossintético pode ser causada pela ação de um ou mais agentes de alteração que são classificados em físico, químico e biológico. Os agentes físicos podem ser a radiação solar ou radiações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , temperatura, abrasão e danos mecânicos. Agentes químicos são a água, ácidos, bases, solventes e outros agentes químicos, oxigênio, ozônio e poluentes atmosféricos. Já como agentes biológicos, têm-se as ações de microrganismos, tais como fungos e bactérias.

Os agentes de alteração podem mobilizar diversos mecanismos de degradação. De acordo com SCHNEIDER (1988), ROBENFELD e COOKE (1988), ABRAMENTO (1995a), ABRAMENTO (1995b), BUDIMAN (1994) e MATHEUS (2002), os principais mecanismos de degradação dos geossintéticos são provocados pela incidência solar, pelo efeito da temperatura, por danos de instalação, por expansão devido à absorção de líquidos, por reações químicas, pela extração de um ou mais componentes do material polimérico e pela ação de microrganismos. A Figura 2.21 exibe um gráfico com estes mecanismos de degradação e a forma com que ocorrem sob efeito isolado ou em conjunto.

Ressalta-se que a degradação acelerada dos geossintéticos ocorre, normalmente, pela combinação entre diferentes agentes de degradação, envolvendo diferentes mecanismos de degradação como, por exemplo, oxigênio e luz, ultravioleta e temperatura, temperatura e oxigênio e outros.

**Figura 2.21. Mecanismos de degradação em geossintéticos**

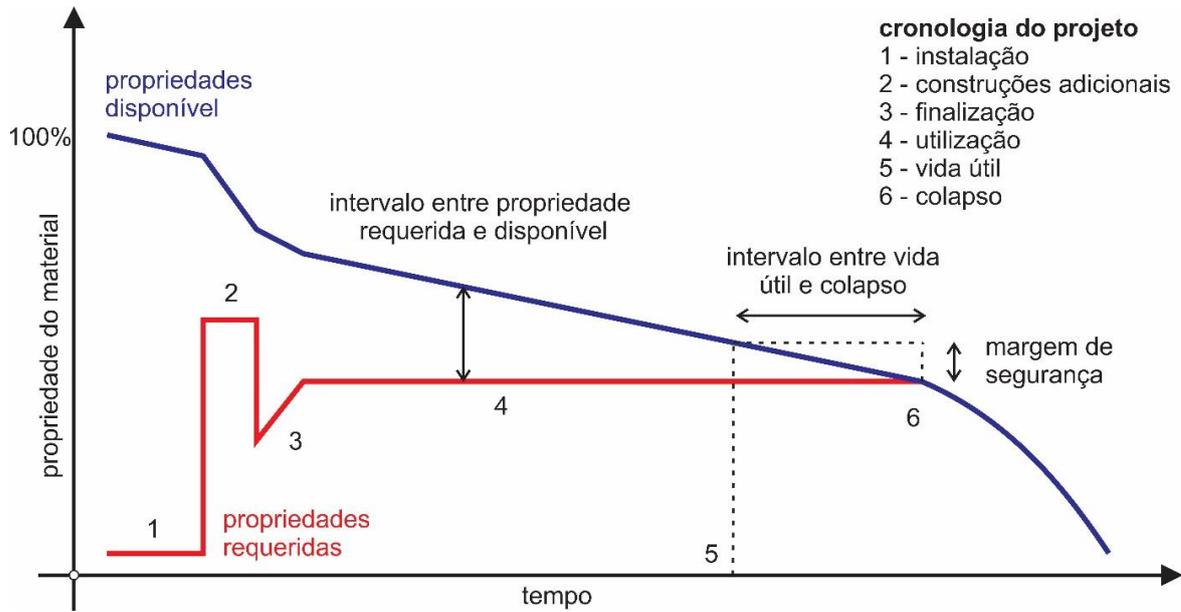


Assim, é fundamental o estudo das transformações dos geossintéticos devido à degradação. Tais transformações podem ocasionar problemas nas obras e até inviabilizar o uso de determinados tipos de materiais. Além disto, o estudo da alterabilidade pode definir a melhor maneira de utilização dos materiais geossintéticos, e sua susceptibilidade a degradações.

### **2.5.3 Metodologias para Avaliação da Durabilidade**

As principais características intrínsecas que interferem na durabilidade de geossintéticos poliméricos são a sua formulação, os possíveis aditivos, a geometria das fibras e a qualidade das ligações. Já as características extrínsecas, são relativas ao meio ambiente a que este material ficará exposta sujeito às intempéries locais e a outras possíveis ações exógenas. Estes fatores interferem diretamente na capacidade dos geossintéticos em manter suas propriedades em projeto durante o tempo desejado. Entretanto, as análises de durabilidade dos geossintéticos é um aspecto importante a ser considerado de acordo com cada projeto, tendo em vista o prolongado contato com agentes de alteração, que podem causar seu envelhecimento prematuro. A Figura 2.22 apresenta as etapas que envolvem a execução de projeto de geossintéticos e onde se encontra a análise de durabilidade.

**Figura 2.22: Comportamento das propriedades do geossintético durante etapas de um projeto**



Fontes: modificado de GREENWOOD *et al.* (2012)

### Métodos Consagrados

Os métodos normatizados são as referências internacionais da ISO/TS 13434 e a ASTM D5970. Elas tratam o assunto apresentando os procedimentos necessários para exposição natural dos geossintéticos. A intenção é fornecer ao usuário, um padrão, pelo qual avaliar a degradação das intempéries com ênfase na energia solar de um local em termos de expectativa de vida do geotêxtil, não em termos de radiação incidente a partir da exposição. Assim, devido à variabilidade do clima no mundo, a comparação direta entre dados de teste obtidos a partir de diferentes locais de exposição é difícil. A fim de realizar qualquer tipo de comparação, a energia radiante solar ultravioleta diária total e acumulada, durante o tempo de exposição natural no campo, devem ser medidas durante o período de exposição. No entanto, os efeitos da temperatura e a umidade não podem ser incorporados na comparação.

Resumidamente, as normas sugerem criação de suportes para os geossintéticos em um ângulo de 45°, com face ao sul, para efeitos máximos de exposição à luz solar. Vale destacar que, nos países no hemisfério sul, a face é virada para norte. O material deve ser preparado para análises com exposição natural mínima de 1, 2, 4, 8, 12 e 18 meses. O comportamento do material será definido em função da variação dos parâmetros característicos devido à alteração do material.

Nessa norma os parâmetros característicos considerados são de resistência e a deformação na ruptura, não fazendo menção aos parâmetros de deformabilidade.

HARDCASTLE *et al.* (2008) analisam os métodos normatizados comparando mudanças em variáveis como a exposição em regiões diferenciadas, umidade e ângulo de exposição. Os autores concluíram que há mudança nas características dos materiais provocadas pela exposição dos geossintéticos em regiões de climas distintos. Esta primeira variável mostrou o quanto a degradação é influenciada em condições diferentes, de acordo com a intensidade das intempéries locais. A umidade e a inclinação foram trabalhadas em conjunto. Inclinações maiores facilitam o escoamento da água e aumentam a absorção por radiação solar. Sair dos limites prescritos em norma pode gerar diferentes resultados em exposições na mesma região.

De acordo com SUITS e HSUAN (2003), este processo pode ser acelerado com procedimentos especiais. A ASTM G90 promove o desgaste acelerado ao ar livre de materiais não metálicos usando a luz solar natural concentrada com equipamento. O método utiliza a técnica de exposição solar com o equipamento de Fresnel (FSC) para concentrar a luz solar natural utilizando 10 espelhos altamente reflexivos. Isso provoca a exposição da amostra a uma intensidade aproximadamente igual a oito vezes a radiação da luz solar natural. O dispositivo acompanha automaticamente a posição do sol e expõe as amostras de 7h e 30min até as 16h e 30min ao espectro completo da luz solar, correspondendo a 9h de exposição. Entre 16h e 30min e 7h e 30min do dia subsequente o equipamento permanece estacionado. Durante o dia, a exposição consiste em ciclos de molhagem e secagem com duração de 60 min, sendo 52 min de secagem, seguido por 8 min da pulverização de água. Quando o dispositivo está na posição estacionária, ocorre a pulverização de água em horários pré-determinados, normalmente às 21h, 0h e 3h, com duração de 3min.

A degradação acelerada em laboratório possui o método especificado pela ASTM D5819 e também a ISO/TS 13434. O processo mais rápido proporciona uma resposta mais rápida das propriedades dos materiais sujeitos a algum tipo específico de alterabilidade ou a sinergia de alguns procedimentos. Entre eles, tem-se degradação biológica, degradação química, fluência por método SIM, danos mecânicos, abrasão, fotodegradação e degradação térmica. É importante destacar que, cada procedimento laboratorial possui norma para produção e análise dos resultados, que é baseado nos comportamentos de propriedades dos geossintéticos após determinado período de exposição ao mecanismo de degradação acelerado.

## Métodos Distintos

A partir dos métodos consagrados, alguns autores analisam a interação de mais de um procedimento normatizado para avaliação da durabilidade. Estes métodos fazem análise da sinergia de exposição dos geossintéticos em mais de um mecanismo de degradação. Desta maneira, sugerem os trabalhos de GIJSMAN e SAMPERS (1997) com termo oxidação e ultravioleta, DIESING *et al.* (1999) com exposição natural e imersão em ácidos com temperaturas diferentes, BENJAMIM *et al.* (2008) com danos de instalação e exposição natural, GUIMARÃES *et al.* (2014) com fluência e exposição natural e GUIMARÃES *et al.* (2015) com ultravioleta e imersão em solução ácida e básica.

A escolha dos métodos varia de acordo com a aplicação do geossintético ao projeto, que está relacionado a mais de um mecanismo de degradação. Situações específicas estudadas por estes autores geraram esta demanda de ensaios e possibilitaram entender melhor o quanto a sinergia pode contribuir com os estudos de durabilidade dos materiais.

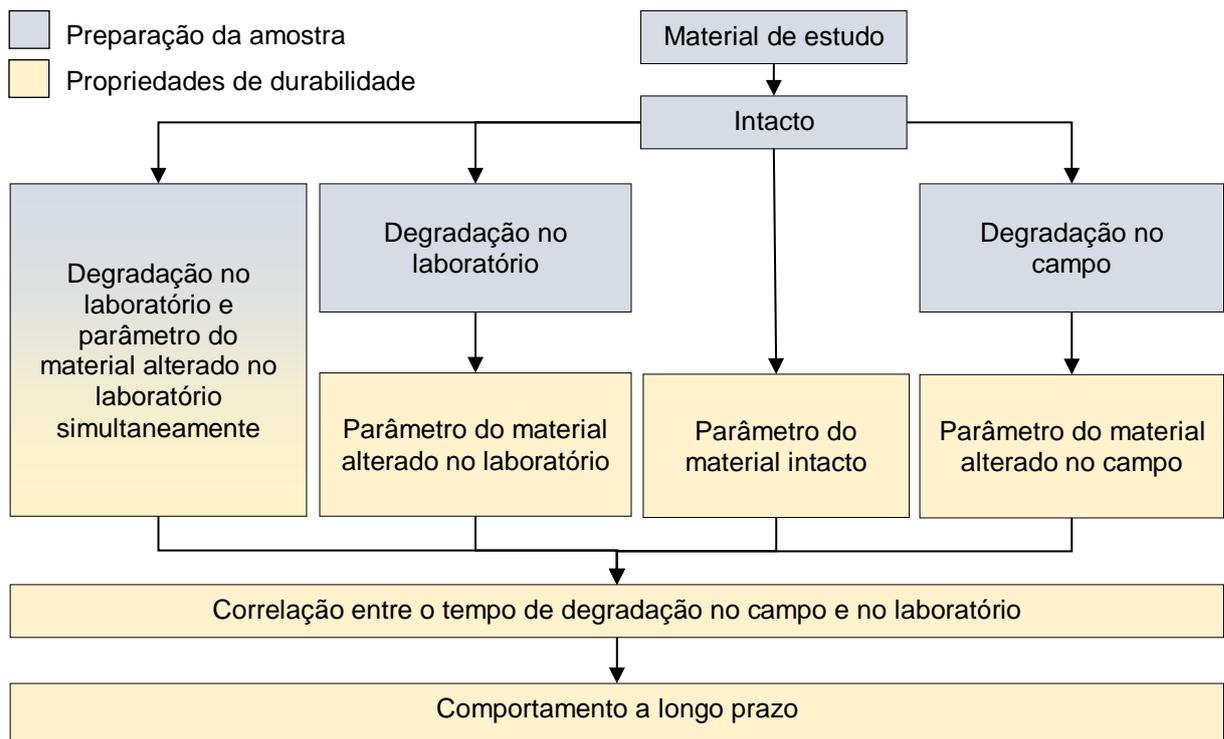
O Laboratório de Ensaio de Durabilidade - GeoLED, uma das unidades do LECIV – UENF, tem trabalhado com correlação dos ensaios isolados de degradação natural no campo com a degradação acelerada em laboratório. Neste método, buscam-se determinar as características físicas, mecânicas e de durabilidade mais relevantes dos materiais. A metodologia para o desenvolvimento do estudo é ilustrada através do organograma indicado na Figura 2.23. Destaca-se que este organograma foi adaptado de SALLES (2006), que também estudou a degradação de Geossintéticos, e MAIA (2001), que estudou a durabilidade de enrocamentos

Deve-se destacar que o material no campo está sujeito a solicitações mecânicas e aos efeitos da degradação natural de forma simultânea.

A forma de utilização dos FTT, em particular, faz com que essa sobreposição de efeitos seja significativa e, portanto, não pode ser desconsiderada na avaliação mecânica e de durabilidade desses materiais.

Assim, a metodologia proposta pela bibliografia necessita de uma adaptação incluindo os procedimentos de laboratório com solicitações mecânicas e de durabilidade de forma simultânea. Particularmente, a sobreposição de efeitos influencia fundamentalmente o comportamento de fluência, à tração ou punção, associado ao efeito da degradação provocado por ciclos de saturação e secagem

**Figura 2.23: Metodologia para avaliação da alterabilidade em geossintéticos**



Nesta metodologia, destacam-se cinco fases. A primeira é a obtenção do material de estudo. Em seguida, vem a produção de amostras com alteração induzida de forma acelerada no laboratório e com alteração natural no campo. Depois da degradação das amostras, faz-se a determinação das propriedades que definem o comportamento característico do material: físico, mecânico, hidráulico ou desempenho. Na sequência, obtenção dos mesmos parâmetros que caracterizam o comportamento destes materiais, com exceção para o material onde a determinação da característica é feita durante o processo de degradação. E por último, a análise dos resultados e previsão do comportamento do material a longo prazo.

Resumidamente, são estudados os materiais nas condições intactas e degradada. Uma parte do material intacto do estudo é destinada à produção de amostras alteradas de forma natural no campo e sob condição acelerada no laboratório. O restante deste, o material alterado naturalmente e o alterado no laboratório, é destinado à determinação dos parâmetros característicos e, conseqüentemente, os parâmetros de durabilidade. A Tabela 2.14 ilustra os trabalhos que consagraram esta metodologia no meio acadêmico com publicações em nível nacional e internacional.

**Tabela 2.14: Trabalhos de com metodologia para avaliação da alterabilidade em materiais**

<b>Material de Estudo</b>	<b>Referências</b>	<b>Observação</b>
Rochas	MAIA (2001); MAIA <i>et al.</i> (2002); MAIA <i>et al.</i> (2003); SALLES e MAIA (2004); MAIA e SALLES (2006); DIAS FILHO (2012); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2012); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2013a); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2013b); SALLES (2013); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2014c); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2016b)	Os estudos permitiram em 15 anos criar um parâmetro de durabilidade dos materiais estudados através da metodologia aplicada.
Cerâmicos	XAVIER (2006); XAVIER <i>et al.</i> (2009); RODRIGUES <i>et al.</i> (2012); ALTOÉ <i>et al.</i> (2012)	Os materiais cerâmicos apresentam seu comportamento muito similar às rochas, incluindo a susceptibilidade à degradação por lixiviação alta.
Geossintéticos	PINTO <i>et al.</i> (2004); SALLES (2006); PINTO (2006); SALLES <i>et al.</i> (2006); SALLES <i>et al.</i> (2007); SALLES <i>et al.</i> (2008); PRELLWITZ <i>et al.</i> (2014); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2015b); DIAS FILHO <i>et al.</i> (2016c)	Os padrões de comportamentos dos materiais também são notados nos geossintéticos apresentados nestas pesquisas. A saturação e secagem mostrou ser o procedimento de degradação mais agressivo

#### **2.5.4 Procedimentos Experimentais para Avaliação da Degradação**

O principal objetivo dos ensaios de degradação é submeter o material à exposição no campo e/ou no laboratório, para posterior determinação da variação das suas propriedades físicas, químicas, hidráulicas, e mecânicas do material em diferentes níveis de degradação. São ensaios que necessitam estudos, a longo prazo, para obter informações sobre os efeitos da degradação em um determinado material com ao longo do tempo.

Os procedimentos de degradação podem ser realizados de forma natural no campo ou de forma acelerada no laboratório. A degradação de campo é empregada em estudos de longa duração. Apresenta a vantagem de expor diretamente as amostras às condições encontradas no meio ambiente exógeno, embora seja necessária a realização de ensaios em diferentes localidades para abranger todas as possíveis variações climáticas.

Os ensaios de degradação no laboratório são utilizados para a previsão da durabilidade em um menor prazo. Os mais utilizados e descritos na literatura para geossintéticos são os processos com variação de temperatura e exposição à radiação ultravioleta. Existem diferentes configurações de equipamentos para estes ensaios. A combinação do efeito da variação de temperatura e da radiação ultravioleta depende das características do equipamento de degradação utilizado.

Dentre alguns procedimentos de degradação no laboratório, podem-se citar oxidação, oxidação, radiação ultravioleta fluorescente ou com arco xenon, degradação química por imersão em soluções ácidas e ou básicas, decomposição por microrganismos, congelamento e descongelamento e outras ciclagens de temperatura, saturação e secagem, lixiviação e ações mecânicas de cargas repetidas.

Uma análise crítica dos diferentes tipos de ensaios é apresentada por MAIA (2001), SALLES (2006), PINTO (2006), DIAS FILHO (2012) e SALLES (2013), a fim de propor uma avaliação do comportamento dos materiais geotécnicos, mostra que existem duas grandes categorias de ensaios. A primeira categoria é dedicada à preparação de amostra degradadas e a segunda se dedica à determinação das propriedades de durabilidade.

### ***Ensaio dedicados à preparação de amostras degradadas ou alteradas***

Amostras de material são submetidas a procedimentos onde se induz ou se prioriza algum mecanismo de degradação. Esses procedimentos podem ser feitos de forma acelerada, no campo ou no laboratório, ou na condição natural de campo. A degradação natural de campo é feita expondo-se o material diretamente ao meio ambiente exógeno. Para isso, o material é colocado em suportes ou bandejas em locais de acesso restrito até o momento em se faz a retirada do material para determinação do seu comportamento. Procedimentos acelerados no campo utilizam equipamentos que amplificam a degradação do material. Normalmente, nos ensaios acelerados em laboratório, se utilizam procedimentos especiais e equipamentos específicos que simulam os mecanismos de degradação predominantes no campo. Após a degradação acelerada, o material também é conduzido para a determinação do seu comportamento característico.

### ***Ensaio dedicados à determinação das propriedades de durabilidade***

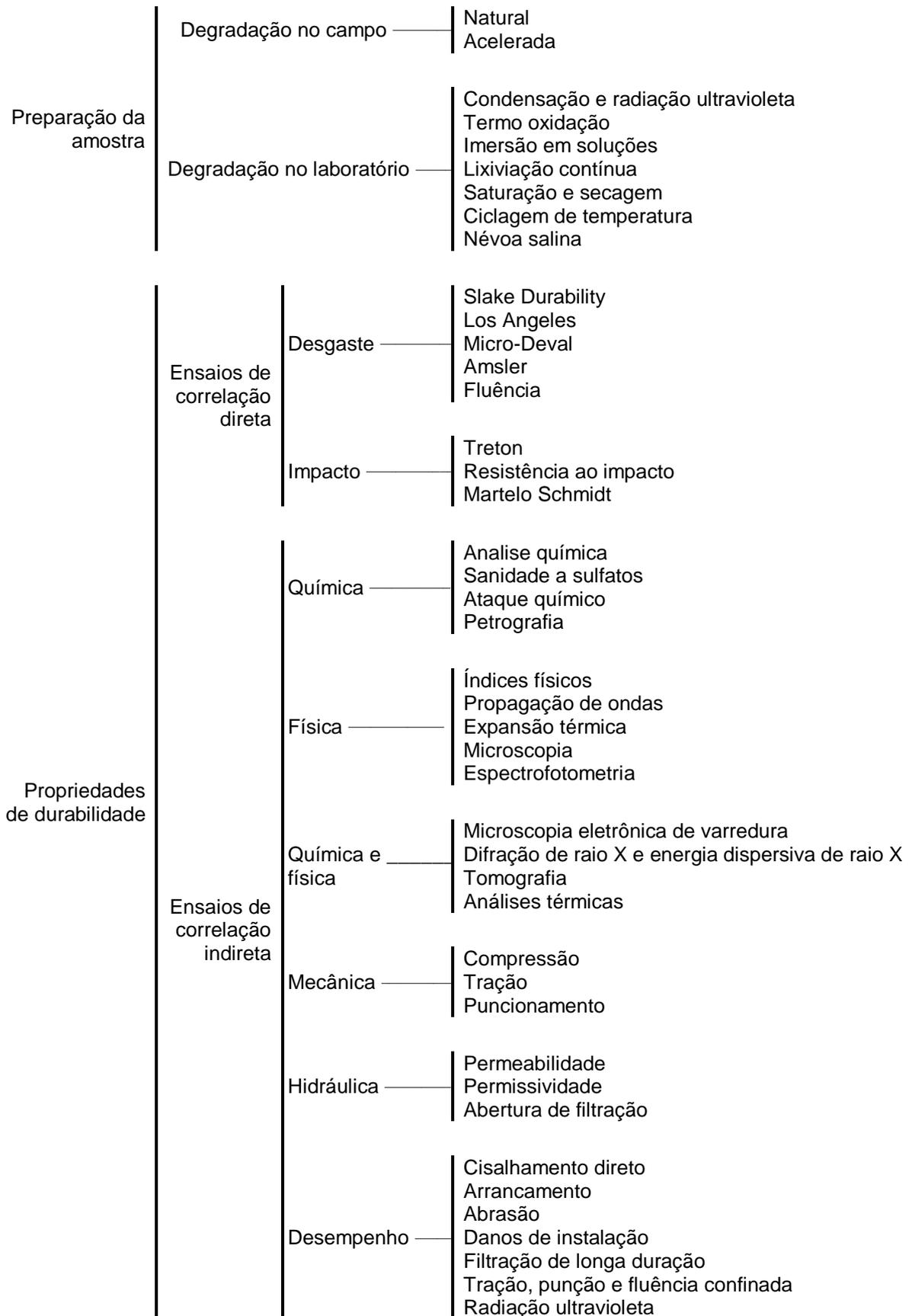
Procura-se determinar propriedades características dos materiais que demonstrem como ocorre a variação de comportamento devido à degradação ou degradação do material. Normalmente, se utilizam ensaios onde a propriedade

determinada represente a condição de trabalho do material, como por exemplo, os parâmetros de resistência, deformabilidade, permeabilidade e outros. A determinação destas propriedades pode ser feita no material intacto, não alterado, ou nos materiais já degradados. No caso particular dos materiais já degradados, os ensaios podem ser feitos tanto em amostras coletadas no campo, através de procedimentos de exumação, quanto em amostras degradadas através de procedimentos da primeira categoria de ensaios, preparação de amostras degradadas ou alteradas.

As publicações sobre degradação de material por exposição no campo e/ou no laboratório para posterior determinação da variação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material estão, cada vez mais, ganhando espaço no meio científico. São ensaios que necessitam estudos, a longo prazo, para obter informações sobre os efeitos da degradação em um determinado material com o tempo e, assim, garantir que o tempo de vida útil seja adequado a cada projeto. Especialmente, para materiais geossintéticos, a bibliografia técnica indica que os procedimentos que se dedicam à produção de amostras degradadas de forma acelerada apresentam, de forma bem característica, as formas mais usuais e que são amplamente utilizadas pela comunidade acadêmica.

Procedimentos não convencionais são ditos especiais, já que focam em técnicas mais exclusivas. Os principais procedimentos e os ensaios característicos para determinação dos parâmetros de durabilidade das pesquisas estão destacados na Figura 2.24. Com ela, é possível determinar os parâmetros de interesse e organizar a melhor forma de caracterização do material escolhido. Vale destacar que, os melhores ensaios de correlação direta para análise de durabilidade são realizados em rochas. No caso de geossintéticos, alguns ensaios de identificados no item preparação de amostra/degradação acelerada no laboratório são utilizados como um indicativo da qualidade do material, mas não a sua durabilidade, que depende de comparativos com ensaios do item propriedades de durabilidade. Para avaliação do comportamento dos geossintéticos a longo prazo normalmente se utiliza o ensaio de desempenho por radiação ultravioleta. Há também o ensaio de fluência, um procedimento de correlação direta para avaliação da durabilidade dos geossintéticos, o qual não está descrito na Figura 2.24. Com a fluência é possível obter o tempo de vida útil do material de acordo com o nível de carregamento.

**Figura 2.24: Procedimentos e ensaios para caracterização dos materiais**



## Exposição no Campo

O meio exógeno é a forma mais precisa de se avaliar o real comportamento dos materiais e os grupos de pesquisa têm se dedicado a criar campos experimentais ao tempo ao redor do mundo. Cada clima e suas principais intempéries proporcionam uma degradação diferenciada de acordo com os agentes de alteração local. A Figura 2.25 ilustra alguns pórticos de estudos da alterabilidade de geossintéticos no Brasil (Figura 2.25 'a', 'b', 'c', 'd' e 'e') e alguns locais no mundo (Figura 2.25 'f', 'g', 'h' e 'i'). Universidades e empresas especializadas estão entre os principais grupos de pesquisa com campos experimentais de exposição no campo.

Figura 2.25. Maior ensaio de fluência realizado em geossintético



(a) Petrolina, PE<sup>1</sup>



(b) Camaçari, BA<sup>1</sup>



(c) Embú das Artes, SP<sup>1</sup>



(d) Campos, RJ<sup>2</sup>



(e) Ilhas Solteiras, SP<sup>3</sup>



(f) Portugal<sup>4</sup>



(g) Hong Kong<sup>5</sup>



(h) Perú<sup>6</sup>



(i) Estados Unidos<sup>7</sup>

Fontes: <sup>1</sup>YOSHIMURA *et al.* (2014); <sup>2</sup>PESSANHA *et al.* (2010); <sup>3</sup>LODI *et al.* (2010); <sup>4</sup>CARNEIRO *et al.* (2009); <sup>5</sup>BRAND *et al.* (1991); <sup>6</sup>DIESING *et al.* (1999) e <sup>7</sup>ATLAS (2016)

A empresa ATLAS, *Material Testing Solutions*, por exemplo, dispõe de instalações para exposição ao ar livre em 1 estado nos países da Coreia do Sul, Índia, Singapura, Canadá, França e Holanda, 2 estados na Austrália, 3 estados tanto na China, Japão e Rússia, e com 8 estados nos Estados Unidos da América. Quando há interesse, pode-se avaliar de forma mais específica a ação dos agentes mais importantes do local de exposição. São os casos de DIESING *et al.* (1999) e ATLAS (2016). No primeiro, a pesquisa consiste na exposição do geossintético ao fluxo de ácidos de uma mina e no segundo, em um equipamento para acelerar os ensaios no campo sob radiação solar. A Tabela 2.15 indica outros trabalhos com o tema.

**Tabela 2.15: Trabalhos de degradação com exposição no campo**

Referências	Material de Estudo	Local de Exposição	Observação
BRAND <i>et al.</i> (1991); LODI <i>et al.</i> (2010)	GTXn	Hong Kong Brasil	As propriedades dos materiais diminuíram, principalmente com gramaturas baixas
SULLIVAN e COOPER (1995)	GBL	Estados Unidos	Perda de 30% da resistência com 22 meses de exposição no campo
DIESING <i>et al.</i> (1999) GULEC <i>et al.</i> (2004)	GTX / GMB	Peru Estados Unidos	A solução ácida e aumento de temperatura agrava o processo de degradação
SUITS e HSUAN (2003)	GTX	Estados Unidos	A temperatura deve ser registrada e incorporada nas análises de durabilidade
DIERICKX e BERGHE (2004)	GMA	Bélgica	Com proteção UV são menos afetadas pela erosão e a massa não se altera com o tempo
SALLES <i>et al.</i> (2006) SALLES <i>et al.</i> (2007) SALLES <i>et al.</i> (2008)	GTX	Brasil	A estrutura física e propriedades mecânicas do material foram afetadas com 14 meses
YANG e DING (2006)	GBL	China	A intensidade e o acúmulo de radiação UV, são fatores que influenciam na durabilidade
KOERNER e KOERNER (2006)	GMB	Estados Unidos	As temperaturas nas geomembranas refletem ciclos das estações do ano
ROWE <i>et al.</i> (2009) ROWE e RIMAL (2008)	GMB	Canadá	Estudos levaram a estimativa de 45 anos de tempo de serviço para os materiais que se degradaram em condições mais agressivas.
CARNEIRO <i>et al.</i> (2009)	GTXn	Portugal	24 meses de exposição com presença de alterações físicas.
MARQUES <i>et al.</i> (2014)	GMA	Brasil	Os valores de resistência chegam a diminuir em até 23% em 12 meses.
YOSHIMURA <i>et al.</i> (2014)	GMB	Brasil	A análise da exposição no campo em diferentes regiões mostra a importância de se avaliar as condições locais dos agentes climáticos
TOUZE-FOLTZ <i>et al.</i> (2015)	GMB	França	Após 15 anos amostras exumadas mostraram-se degradadas e permeabilidade bem elevada.

## **Exposição no Laboratório**

A exposição no laboratório de geossintéticos pode ser dividida entre procedimentos usuais, que envolvem equipamentos e métodos consagrados, e procedimentos especiais, que são formas mais específicas e ainda não usuais na caracterização dos geossintéticos.

### **Procedimentos Usuais**

#### **Termo Oxidação**

No ensaio, as amostras são inseridas em dentro de estufa, forno ou autoclave, o qual é ilustrado pela Figura 2.26. Durante o ensaio os geossintéticos são submetidos à temperatura, pressão de oxigênio e possíveis imersões em tempo definidos predeterminados, para que posteriormente seja verificada, através de ensaios de resistência, por exemplo, a variação das características e comportamento dos materiais em cada etapa de retirada do material da câmara de degradação. Este procedimento é utilizado para avaliar a resistência à oxidação dos materiais. A Tabela 2.16 possui uma listagem de trabalhos sobre o tema.

**Figura 2.26. Esquemático e equipamento de termo oxidação**



Fonte: modificado de Hsuan *et al.* (2008)

**Tabela 2.16: Trabalhos de degradação com equipamento de termo oxidação**

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
VINK e FONTIJN (2000)	GTX	Estufa	O tipo de material influencia na velocidade de degradação por oxidação
MATHEUS (2002)	GTX GMB	Estufa	As geomembranas não apresentaram mudanças significativas e os geotêxteis redução de resistência e rigidez para elevados níveis de temperatura
LODI e BUENO (2004)	GMB	Estufa	Variações nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais
ASTRUC <i>et al.</i> (2004)	GTX	Autoclave	A utilização de solução alcalina no mostrou-se adequado para uma rápida avaliação da durabilidade do material
COLMANETTI (2006)	GMB	Estufa	A durabilidade é compatível com o tempo de vida útil esperado para barragens.
CARNEIRO <i>et al.</i> (2008a) CARNEIRO <i>et al.</i> (2008b) CARNEIRO <i>et al.</i> (2006)	GTXw	Forno	Circulação de ar, temperatura alta e imersão ocasionam maior alterabilidade
RICHAUD <i>et al.</i> (2008) RICHAUD <i>et al.</i> (2006)	GTXw	Forno e Autoclave	Temperaturas acima de 80° foram pouco representativas
THOMAS e MAUBEUGE (2008)	GTXw	Forno	Maiores exposições de oxigênio promoveram maior alterabilidade nas amostras
ROWE <i>et al.</i> (2009)	GMB	Autoclave	A imersão e temperaturas maiores que 20° diminuem consideravelmente a durabilidade
LODI <i>et al.</i> (2009)	GMB	Estufa	Auxiliam na interpretação de resultados
MÜLLER <i>et al.</i> (2014)	GTX	Autoclave	A durabilidade ultrapassa os 100 anos
GREENWOOD e CURSONB (2012)	GGR	Estufa e Autoclave	Tempo de serviço estimado de 70 anos para procedimento em autoclave e 2700 em estufa
EWAS <i>et al.</i> (2014)	GMB	Autoclave	Foram induzidas pressões de oxigênio altas e baixas. A boa correlação de durabilidade deve considerar a composição do material

### **Condensação e Radiação ultravioleta**

A radiação solar que atinge a superfície da Terra possui comprimentos de onda compreendidos entre os 295 e os 3000 nm. O espectro da radiação solar, que atinge a superfície terrestre, pode ser dividido em três regiões: radiação UV entre 295 e 400 nm, radiação visível entre 400 e 780 nm e radiação infravermelha entre 780 e 3000 nm. A Figura 2.27 mostra uma ilustração geral sobre os espectros e a Figura 2.28 o equipamento de Condensação e Radiação Ultravioleta.

Figura 2.27. Espectros de luz natural e artificial de UVA, UVB e arco de xenon.

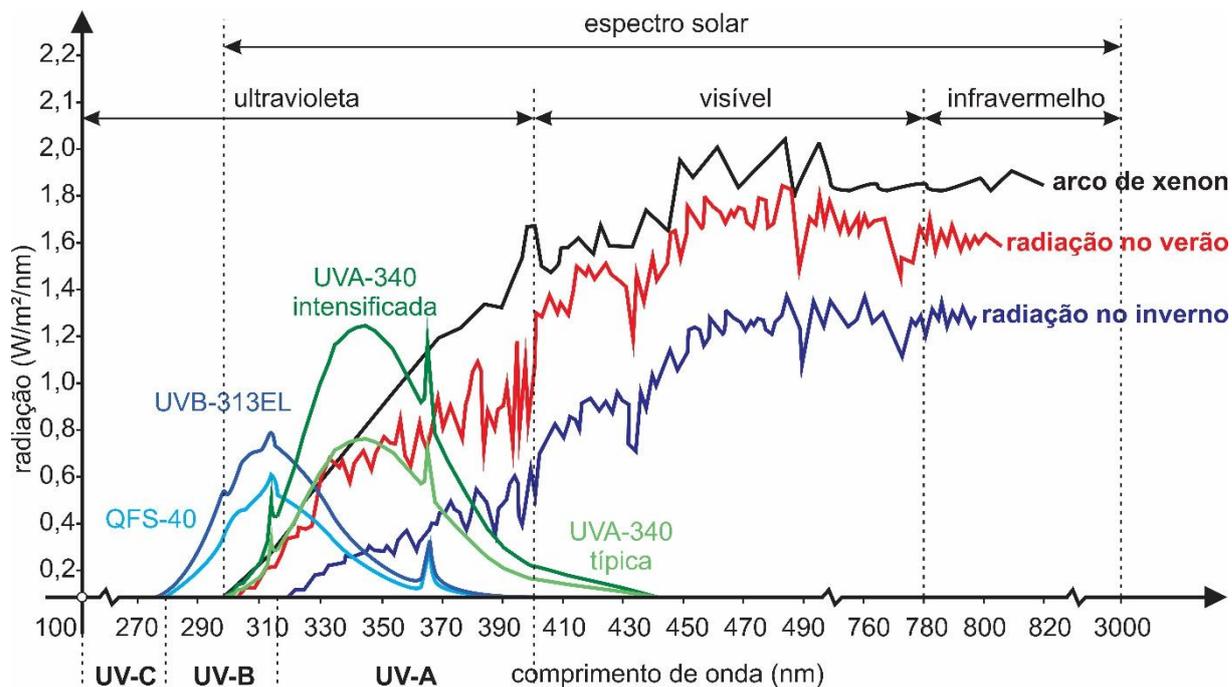
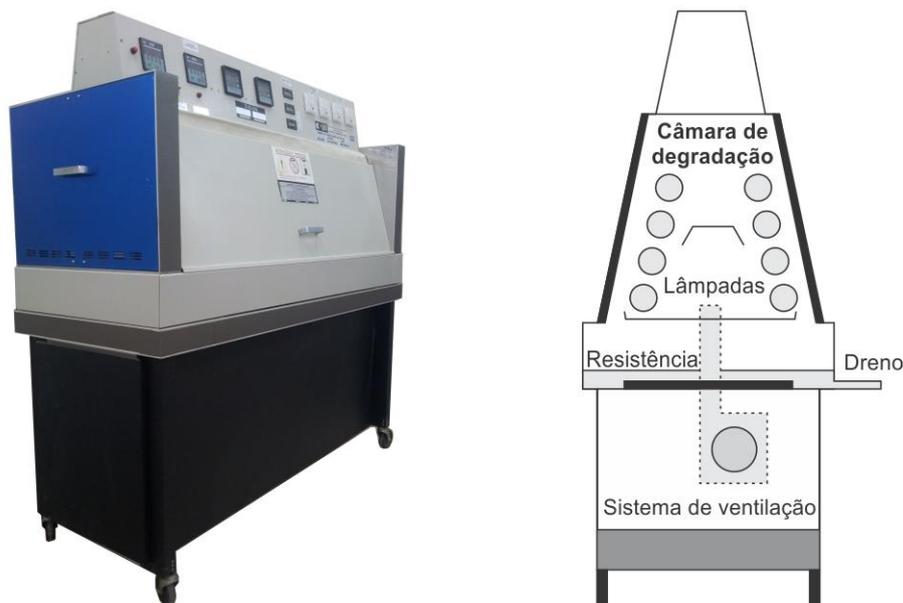


Figura 2.28. Esquemático e equipamento de condensação e radiação ultravioleta



Fonte: modificado de Dias Filho (2012)

O equipamento simula condição de degradação provocada pela exposição aos raios solares e variações de umidade. No ensaio, as amostras são submetidas a ciclos de condensação e de exposição à radiação ultravioleta, ambos sob temperatura controlada. No equipamento, podem-se utilizar as lâmpadas apresentadas na Figura 2.27, que variam com a escolha da metodologia. Alguns trabalhos com estudos variados sobre este procedimento estão ilustrados na Tabela 2.17.

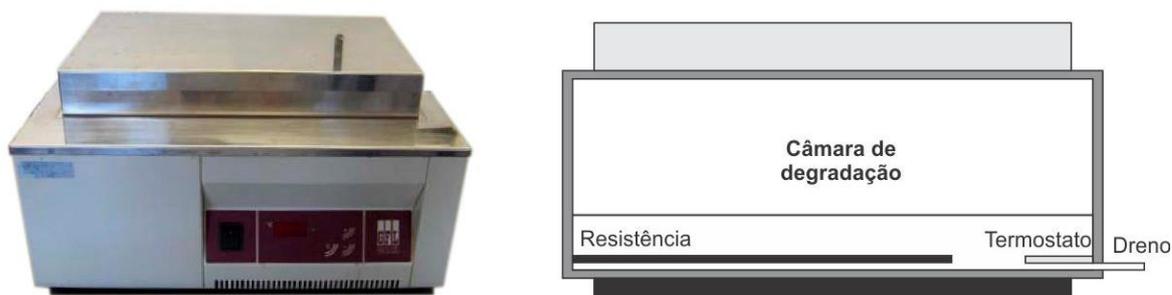
**Tabela 2.17: Trabalhos de degradação com equipamento de radiação ultravioleta**

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
SULLIVAN e COOPER (1995)	GBL	UV-A, UV-B e Arco xenon	As lâmpadas UV-B degradaram mais os materiais em relação ao arco xênon e UV-A
SUITS e HSUAN (2003)	GTXn	UV e arco xenon	O arco xenon acelerou o processo de degradação em relação ao método com UV.
LODI (2003)	GMB	UV	Os ensaios de degradação são úteis na qualificação das propriedades dos materiais.
PINTO <i>et al.</i> (2004)	GTX	UV-B	A degradação foi influenciada pelos aditivos.
MATHEUS <i>et al.</i> (2004)	GTX GMB	Arco xenon	Os materiais pouco se alteraram, mostrando a eficácia de aditivos anti-UV
YANG e DING (2006)	GBL	UV	A intensidade e o acúmulo de radiação UV, são fatores que influenciam na durabilidade
LODI <i>et al.</i> (2007); BENJAMIM <i>et al.</i> (2008)	GMB	UV-A	Os resultados apresentaram variações para as propriedades mecânicas avaliadas: resistência à tração, deformação e rigidez
SALLES <i>et al.</i> (2008)	GTX	UV-B	A estrutura física do material é afetada
HSUAN <i>et al.</i> (2008)	GTXn	UV e Arco xenon	A escolha do procedimento deve-se adequar ao objetivo da pesquisa
LIMA <i>et al.</i> (2014)	GTXn	UV-A	Perda de resistência em torno de 30% em 200 horas de exposição
RICHGELS <i>et al.</i> (2015)	GMB	UV-A	Perda próximo a 60% do valor de resistência e previsão de trabalho de 30 anos
GUIMARÃES <i>et al.</i> (2015)	GTXw	UV	Em 1080 h o material perdeu apenas 8,4% da resistência mecânica

### **Exposição à Líquidos**

No ensaio, as amostras são inseridas em estufa, com temperatura e tempo definidos, para que posteriormente seja verificada, através de ensaios de resistência, a variação das características e comportamento dos materiais. A Figura 2.29 apresenta um equipamento de pequeno porte e a Tabela 2.18 algumas pesquisas.

**Figura 2.29. Esquemático e equipamento de exposição à líquidos**



Fonte: modificado de Carneiro (2012)

**Tabela 2.18: Trabalhos de degradação com equipamento de exposição à líquidos**

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
MUELLER <i>et al.</i> (2003)	GTXn	Imersão em água	A degradação ocorrida e o ambiente são importantes para se determinar a resistência a oxidação real no campo.
GULEC <i>et al.</i> (2004)	GMB	Imersão em ácido	A durabilidade variou entre 46 e 426 dependendo da comparação com o ambiente
GOMES <i>et al.</i> (2006)	GTXn	Imersão em águas	Em águas sulfurosas a alterabilidade aumentou. Perdas de resistência mensais na ordem de 2% e vida útil próxima a 10 anos
MÜLLER-ROCHHOLZ <i>et al.</i> (2008)	GGR	Imersão em base	Em temperaturas altas os materiais degradaram em menor tempo
JAILLOUX <i>et al.</i> (2008)	GBL	Imersão em ácido e base	A temperatura potencializa a degradação
DEROMBISE <i>et al.</i> (2010)	GTX	Imersão em base	Observou-se correlação inversa entre o nível de porosidade e a resistência à tração, onde solução mais básica aumentou a porosidade
SAHA <i>et al.</i> (2012)	GTX	Imersão em ácido	Estima-se que os geotêxteis da pesquisa percam 50% de sua resistência mecânica entre 3 e 4 anos.
GUIMARÃES <i>et al.</i> (2015)	GTX	Imersão em ácido e base	As perdas foram em torno de 7% da resistência

### ***Procedimentos Especiais***

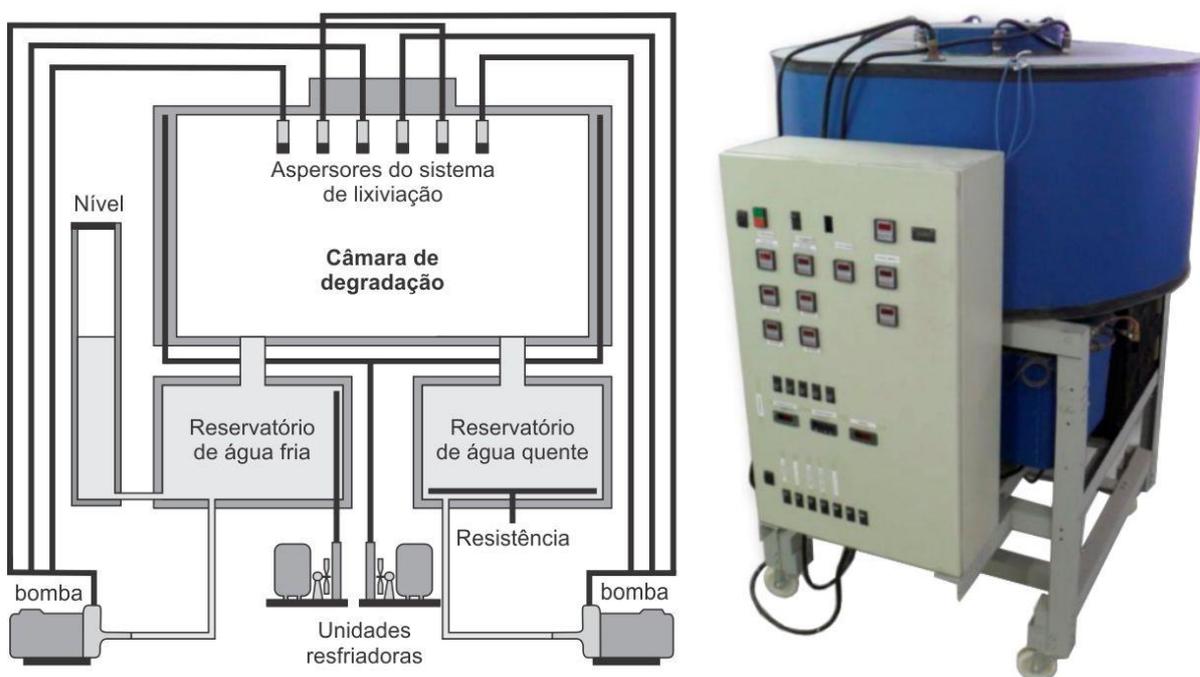
#### ***Lixiviação Contínua***

A lixiviação contínua permite submeter amostras do material em estudo a períodos controlados de variação de temperatura, de precipitação e de flutuação do nível da solução de lixiviação. Estas condições possuem boa representatividade quando comparadas à degradação natural.

Os ciclos de lixiviação contínua podem, ainda, ser programados de acordo com as principais características climáticas da região, a fim de fornecer resultados mais confiáveis quando comparados à degradação natural no campo.

O equipamento Soxhlet convencional é capaz de promover a degradação apenas em amostras com pequeno volume. No entanto, existem equipamentos de grandes dimensões capazes de submeter amostras de grandes volumes como a do Laboratório de Degradação da UENF. A Figura 2.30 apresenta o equipamento e um esquemático com detalhamento dos principais componentes e a Tabela 2.19 os trabalhos técnicos com o procedimento de degradação.

Figura 2.30. Esquemático e equipamento de degradação universal da UENF.



Fonte: modificado de Maia *et al.* (2009) e Dias Filho *et al.* (2013b)

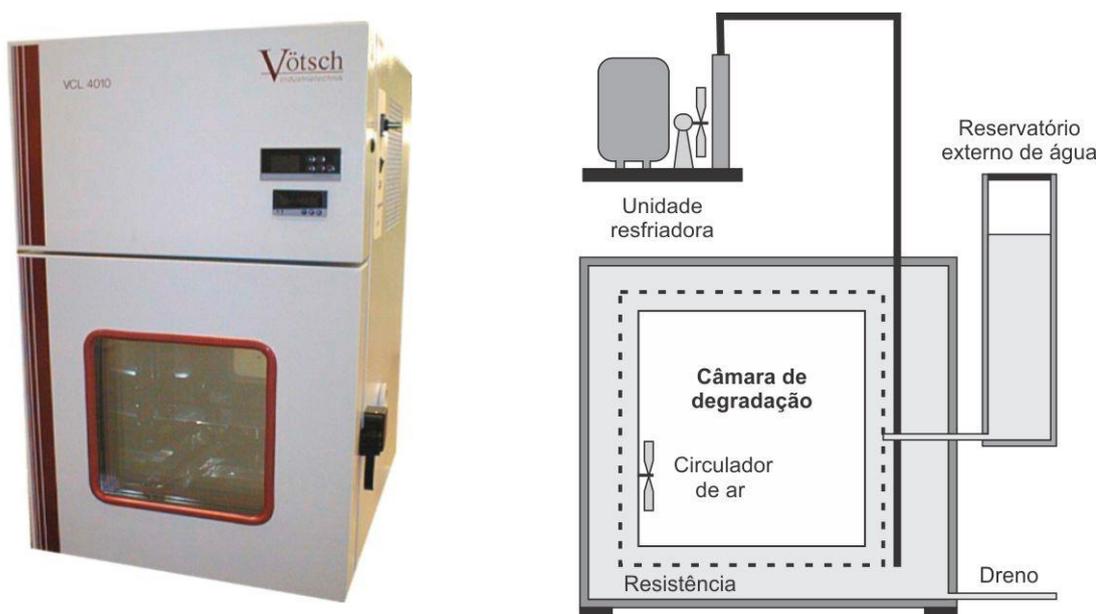
Tabela 2.19: Trabalhos de degradação com equipamento de lixiviação contínua

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
DIESING <i>et al.</i> (1999)	GTX	Solução ácida	A solução ácida da mina promoveu a degradação dos geotêxteis, os quais não apresentaram problemas como filtro
LODI (2003)	GMB	Soxhlet	Os ensaios de degradação são bastante úteis na qualificação da degradação
GULEC <i>et al.</i> (2004)	GMB	Solução ácida	O aumento de temperatura e a solução ácida agravam o processo de degradação. Casos críticos estudados geram vida útil de até 46 anos, enquanto baixas temperaturas e menor acidez prolongam o uso por 426 anos
SALLES (2006) PINTO (2006) SALLES <i>et al.</i> (2007)	GTX	Equipamento de Degradação Universal da UENF e Soxhlet	A quantidade de aditivos antioxidantes afeta significativamente e de formas distintas o comportamento mecânico e de durabilidade dos geotêxteis
SALLES <i>et al.</i> (2008); MAIA <i>et al.</i> (2009)	GTX		A degradação provocada pelo equipamento mostrou-se adequado para estudos da durabilidade e com perdas de propriedades superiores aos ensaios no equipamento de condensação e radiação ultravioleta
ROWE <i>et al.</i> (2009); ROWE e RIMAL (2008); ROWE (2007)	GMB	Soxhlet	A vida útil das geomembranas imersas e lixiviadas variam da ordem dos 10 a 300 anos dependendo das condições de ensaios

## **Ciclagem de temperaturas altas e baixas**

Este procedimento tenta reproduzir, no laboratório, a degradação do material provocada pelas variações da umidade e da temperatura do material no campo sem contato direto com a água. A Figura 2.31 apresenta o equipamento de ciclagem da UENF com gradiente de temperatura entre  $-40^{\circ}$  até  $180^{\circ}$  e Tabela 2.20 elenca trabalhos que avaliaram este procedimento em geossintéticos utilizados em situações específicas, onde a ciclagem permite acelerar o processo e avaliar casos de congelamento e descongelamento para material utilizado em lugares frios e enterrados, bem como variações de temperaturas quentes em situações como em aterros sanitários e de rejeitos.

**Figura 2.31. Esquemático e equipamento de ciclagem de temperaturas altas e baixas**



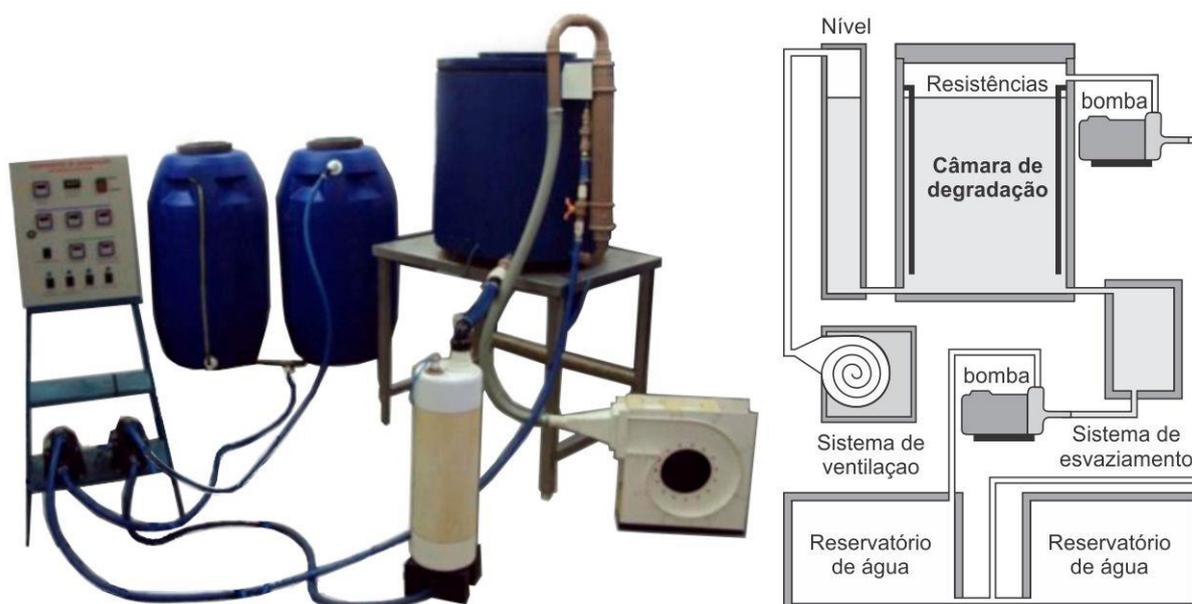
**Tabela 2.20: Trabalhos de degradação com equipamento de ciclagem de temperatura**

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
ROWE (2007)	GCD	Congelamento e descongelamento	Geocompostos podem funcionar de forma satisfatória como uma barreira hidráulica
ROWE <i>et al.</i> (2011); THIEL <i>et al.</i> (2006)	GCD	Variação de temperatura entre $20^{\circ}$ - $60^{\circ}$	Os autores destacam o encolhimento dos geocompostos podendo gerar 16 % de mudanças nas propriedades do conjunto
GHAZAVI <i>et al.</i> (2013)	GTX	Congelamento e descongelamento	O reforço do solo não foi prejudicado com a análise sugerida e o conjunto se manteve resistente

## Ciclagem de Saturação e Secagem

O procedimento de ciclagem por saturação e secagem tenta reproduzir, no laboratório, a degradação do material provocada pelas variações da umidade e da temperatura do material no campo com momentos em que há saturação dos materiais. As condições de degradação no laboratório não são as mesmas que as condições de degradação no campo. No entanto, os resultados podem ser explorados em situações de aplicações em que há similaridade das condições de degradação no campo, onde a flutuação do nível d'água promove saturação e secagem mais constantes. A Figura 2.32 ilustra o Equipamento de Degradação e Saturação e Secagem da UENF e a Tabela 2.21, trabalhos onde são utilizados o procedimento de ciclagem.

Figura 2.32. Esquemático e equipamento automático de saturação e secagem da UENF.



Fonte: modificado de Sampaio (2010) e Dias Filho (2012)

Tabela 2.21: Trabalhos de degradação com equipamento de saturação e secagem

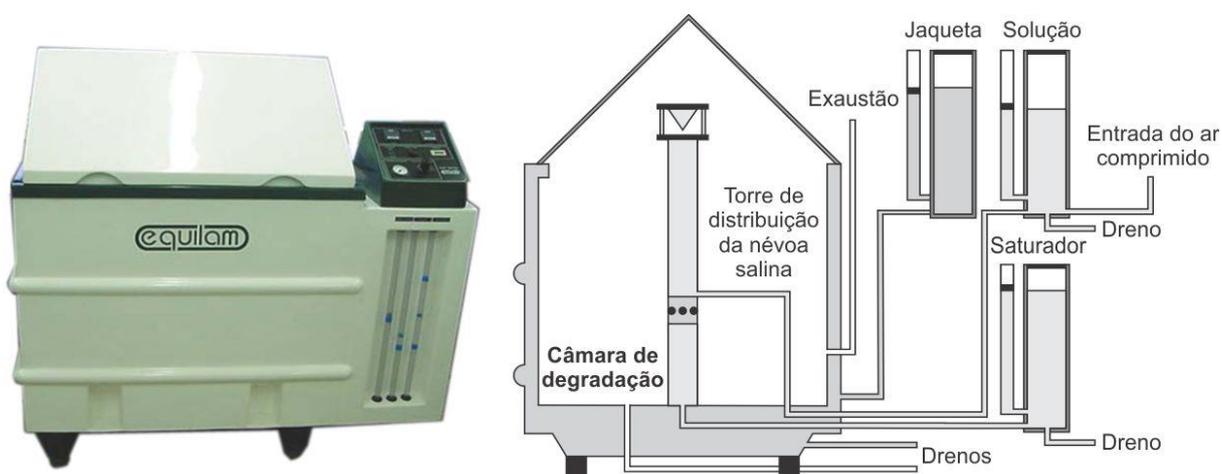
Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
KOERNER e KOERNER (2006)	GMB	Lençol freático	O monitoramento e instrumentação são aliados para análises de durabilidade
ROWE <i>et al.</i> (2009); ROWE e RIMAL (2008); ROWE (2007)	GMB	Água destilada	Dependendo da temperatura a vida útil pode variar da ordem dos 10 a 35 anos
PRELLWITZ <i>et al.</i> (2014); SALLES <i>et al.</i> (2007); SALLES (2006); PINTO (2006)	GTX	Água destilada	Procedimento de maior alteração do comportamento mecânico dos materiais em relação a lixiviação contínua e ultravioleta

## Exposição à Névoa Salina

A classificação do ambiente atmosférico está baseada na localização geográfica e nos poluentes atmosféricos associados entre si que contribuem para seu processo de corrosão. Portanto, um ambiente marinho é caracterizado pela proximidade em relação ao oceano e, conseqüentemente, pela maresia que pode produzir danos severos de corrosão em materiais variados, acelerando a deterioração dos sistemas de revestimentos que têm como função básica a proteção, e no caso específico de rochas ornamentais, que tem função estética.

Existe ainda, a degradação de rochas usadas em enrocamento de quebra-mares e diques. Neste caso, deve-se considerar também a degradação provocada pelo efeito das ondas que desgastam progressivamente os contatos entre partículas e provocam a deformação do material. A Figura 2.33 apresenta detalhes do equipamento de exposição à névoa salina e a Tabela 2.22 indica dois trabalhos que utilizam materiais em fibras naturais.

Figura 2.33. Esquemático e equipamento de exposição à névoa salina



Fonte: modificado de Dias Filho (2012)

Tabela 2.22: Trabalhos de degradação com equipamento de névoa salina

Referências	Material de Estudo	Análises Sugeridas	Observação
SAHA <i>et al.</i> (2012)	GTX	Solução de 3% NaCl	A exposição por até 120 dias das 3 amostras de geotêxteis geraram perdas de até 80 % da resistência mecânica
AHN <i>et al.</i> (2013)	GTXn	Solução de 10% NaCl	Exposição de 500 horas ocasionou perda de suas propriedades mecânicas em até 50 %

## **2.6 Considerações Finais**

Este capítulo apresentou informações importantes sobre o comportamento geomecânico e de durabilidade das FTT. Com isso, foram apresentados e caracterizados os principais parâmetros dos ensaios de acordo com a literatura e normas nacionais e internacionais vigentes. Todas as formas de caracterização mais comuns às FTT são apresentadas e discutidas.

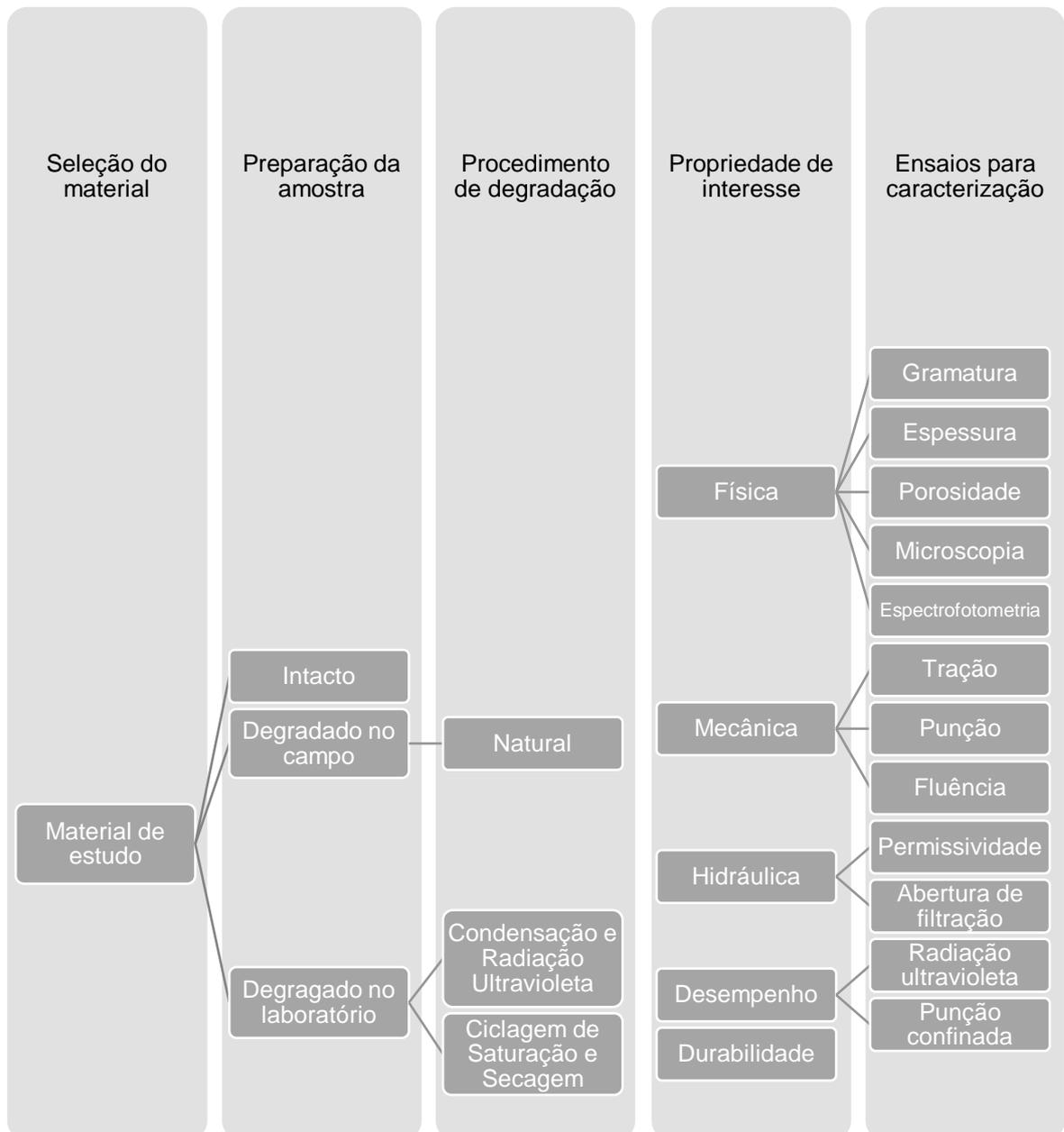
As metodologias de estudos de durabilidade são apresentadas e foram destacadas formas de avaliar o comportamento a longo prazo de geossintéticos utilizados em obras com utilização de exposição natural no campo e acelerada em laboratório. Os métodos consagrados e especiais são expostos com uma revisão de alguns trabalhos e conclusões sobre os estudos de degradação.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os materiais de estudo, os equipamentos, incluindo os processos de fabricação, montagem e dimensionamento de cada peça, descrição de cada um deles, os ensaios realizados em cada um e a metodologia empregada em cada etapa. A Figura 3.1 apresenta um organograma com a estrutura e apresentação detalhada do programa experimental.

Figura 3.1. Programa experimental

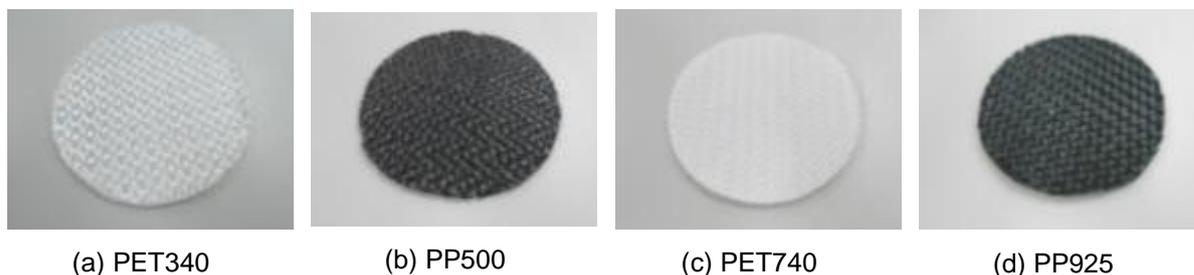


Observa-se que as três primeiras etapas de realização do projeto o material é o destaque. Após a sua escolha, tem-se a preparação das amostras. A partir deste momento já foram definidos os ensaios de caracterização de acordo com as propriedades de interesse. Portanto, pode ser apresentada com precisão, a quantidade de material para cada procedimento de degradação. As etapas 4 e 5 podem ser realizadas nas amostras intactas e após os procedimentos de degradação.

### 3.2 Material de Estudo

Nesta pesquisa, foram utilizados quatro geotêxteis tecidos, sendo dois em laminetes de polipropileno e dois em multifilamentos de poliéster. Estes materiais são utilizados para confecção de geotubos em diversas obras hidráulicas. A Figura 3.2 apresenta estes materiais que foram identificados com uma nomenclatura que une a sigla do polímero base e o resultado do ensaio de gramatura.

**Figura 3.2. Geotêxteis tecidos utilizados na tese**



### 3.3 Equipamentos

O desenvolvimento de grande parte dos equipamentos foi parte fundamental da tese. Foram 2 anos desde a realização do projeto, elaboração de orçamentos, compra dos materiais constituintes, até a montagem e construção. A realização dos ensaios de fluência acelerada contemplou a criação de braços de alavanca, suporte para realização dos ensaios, garras de punção e tração, pórtico para reação do sistema de fluência acelerada com o sistema de saturação e secagem e seus periféricos, além do dimensionamento do sistema. Além deste grande sistema de ensaios, outros equipamentos utilizados e outros mais desenvolvidos são apresentados. A Figura 3.3 apresenta imagens que caracterizam boa parte dos trabalhos realizados durante a pesquisa desta tese.

**Figura 3.3. Fases de fabricação e montagem dos equipamentos da tese**



(a) equipamento de corte



(b) separação das peças



(c) solda e fixação de apoios



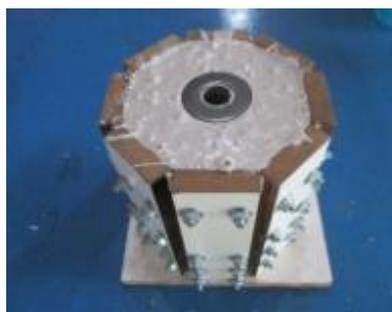
(d) furos e roscas



(e) hastes de puncionamento



(f) pintura e acabamento



(g) apoio de alavancas central



(h) base do equipamento



(i) módulos do pórtico

### **3.3.1 Fabricação e Montagem**

A ordem do dimensionamento e de execução de cada peça dos equipamentos de fluência contemplou, primeiramente, a avaliação dos pesos necessários para gerar as tensões constantes em cada material pesquisado. Foi necessário realizar ensaios de tração e puncionamento, que permitiram, junto à calibração do sistema, a determinação das cargas necessárias para gerar o nível de tensão desejado. Sendo assim, os primeiros elementos estudados foram os braços de alavanca. Com eles, foi possível diminuir as cargas para a realização dos ensaios. Estes elementos foram avaliados separadamente quanto ao tipo de ensaio de fluência, acelerado ou convencional, e tipo de garra, tração ou puncionamento.

## Braços de Alavanca

Os braços de alavanca foram feitos com barras de ferro de 2" x 1/4", cortadas no tamanho de 89 cm e furos de 26 mm, usinados na Centrífuga Geotécnica da UENF. Nesta repartição do Laboratório da Engenharia Civil, foi utilizado o Equipamento Romi Discovery 560 para obterem-se com exatidão os furos para encaixe dos rolamentos e distâncias para reações iguais em cada alavanca.

A Figura 3.4a apresenta as alavancas com seus três furos. O primeiro e o segundo servem de apoio para o sistema. A distância entre os eixos é de 4 cm. Já a distância entre eixos do segundo e do terceiro furo é de 80 cm (Figura 3.4b). Esta relação permite gerar cargas nos corpos de prova entre 20 e 30 vezes o valor da carga aplicada com as estruturas de PVC integrado no braço de alavanca.

A alavanca utilizada para o ensaio de punção é classificada como inter-resistente (Figura 3.4c), isto é, a aplicação da força resistente do geossintético está entre a aplicação da força devido ao peso do tubo de PVC, e o ponto de apoio, preso no suporte dos braços de alavanca. Quando a alavanca é utilizada para o ensaio de tração é classificada como interfixa (Figura 3.4d), isto é, o ponto de apoio está entre as forças aplicadas pelos pesos do tubo de PVC e a reação do geossintético.

Depois que os equipamentos foram finalizados, avaliaram-se, de forma mais precisa, os valores das forças resistentes de acordo com a carga aplicada ao braço de alavanca para determinar os pesos estabelecidos no procedimento de ensaio. A Figura 3.5 ilustra as curvas de calibração realizadas no suporte de fluência convencional e acelerada para os ensaios na garra de punção e tração.

Figura 3.4. Alavancas dos ensaios de fluência

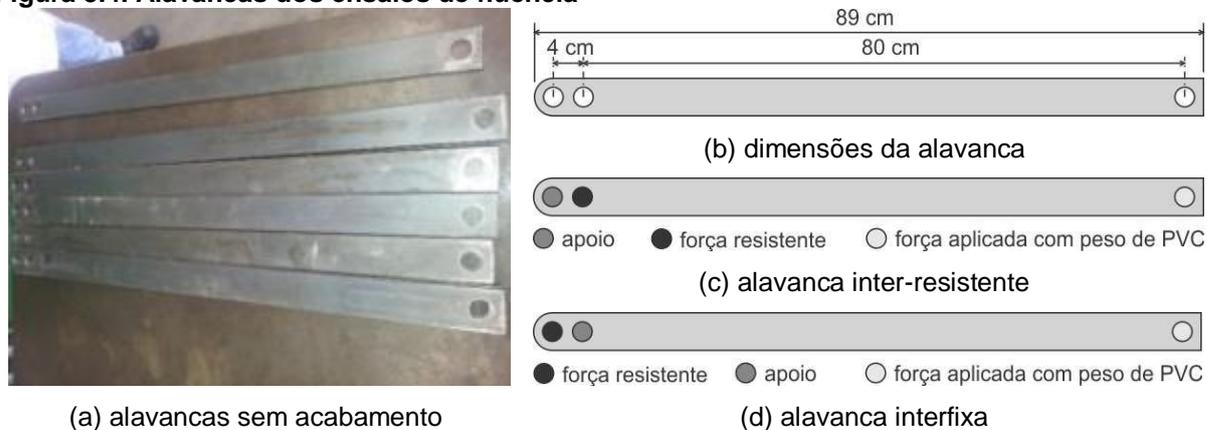
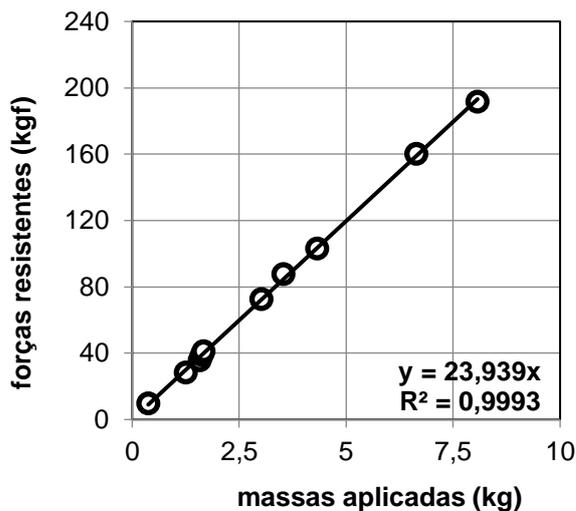
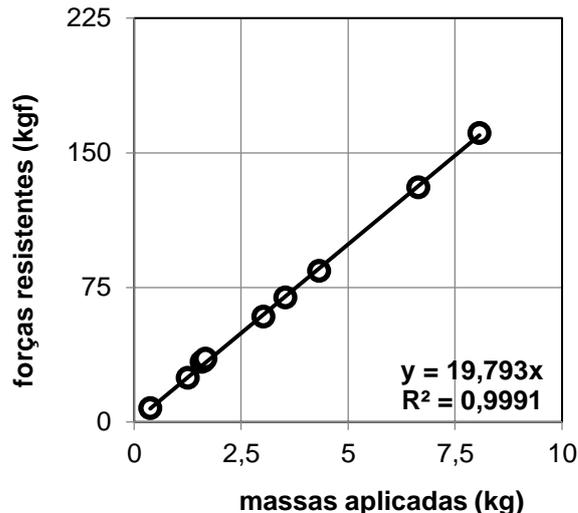


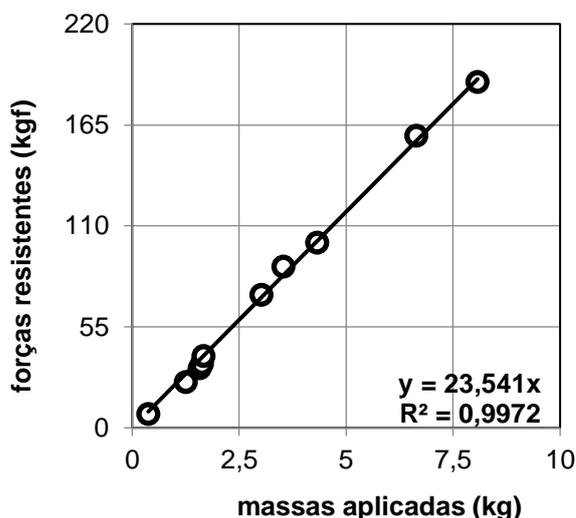
Figura 3.5. Curva de calibração para determinação dos pesos nas alavancas de cada ensaio



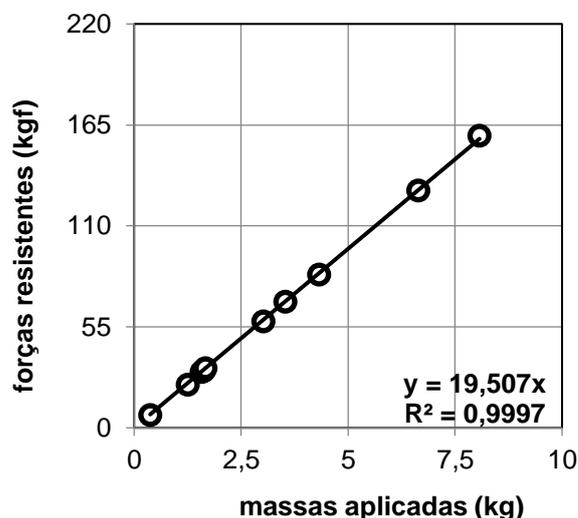
(a) tração – fluência convencional



(b) punção – fluência convencional



(c) tração – fluência acelerada



(d) punção – fluência acelerada

### Montagem dos Pesos

Os pesos foram confeccionados em tubos de PVC com volume de até 4,24 litros (Figura 3.6). O preenchimento foi realizado com barras de ferro de diferentes diâmetros, além de porcas e arruelas para valores precisos podendo chegar a 31 kg.

As Tabela 3.1 e Tabela 3.2 indicam os valores obtidos para cada peso, em quilogramas, de acordo com o determinado pela calibração realizada nos equipamentos de fluência convencional e acelerada.

Figura 3.6. Pesos confeccionados com tubos de PVC com preenchimento em barras de ferro



(a) conjunto de pesos utilizados



(b) detalhe do peso fixado ao sistema de fluência

Tabela 3.1: Massa dos ensaios de fluência convencional

Ensaio	Material	10%	20%	30%	40%
Punção	PET340	1,955	3,909	5,864	7,818
	PP500	2,734	5,468	8,201	10,935
	PET740	2,811	5,622	8,433	11,243
	PP925	3,515	7,030	10,545	14,060
Tração	PET340	1,096	2,193	3,289	4,386
	PP500	2,218	4,436	6,654	8,872
	PET740	3,075	6,150	9,224	12,299
	PP925	3,150	6,299	9,449	12,598

Tabela 3.2: Massa dos ensaios de fluência acelerada

Ensaio	Material	10%	20%	30%	40%
Punção	PET340	1,984	3,967	5,951	7,935
	PP500	2,774	5,549	8,323	11,098
	PET740	2,853	5,705	8,558	11,411
	PP925	3,567	7,135	10,702	14,269
Tração	PET340	1,115	2,229	3,344	4,458
	PP500	2,255	4,509	6,764	9,019
	PET740	3,126	6,251	9,377	12,503
	PP925	3,202	6,403	9,605	12,807

### ***Nivelamento dos Ensaios***

O tempo faz os braços de alavanca girar e sair do nível. Sabendo disso, a construção dos equipamentos exigiu sistemas de nivelamento para a tensão permanecer constante durante todo o ensaio. As estruturas utilizadas permitem ao ensaio de fluência por tração até 5 cm de movimento e, aos ensaios de fluência por punção, 4 cm.

## ***Fluência Convencional***

Este ensaio foi realizado conforme as normas descritas no item de caracterização mecânica de geossintéticos do Capítulo 2, bem como as exigências de confecção dos equipamentos para os testes.

### ***Suporte dos Braços de Alavanca***

A Figura 3.7 exhibe 8 sistemas de Fluência Convencional. Com os equipamentos, são realizados 16 ensaios simultâneos de fluência, sendo 8 de fluência com garras de tração e 8 com garras de punção. O sistema é composto por perfis metálicos “U” soldados e fixados em viga por 2 parabolts, situados próximos aos apoios, que estão localizados aproximadamente ao eixo da viga pintados de azul e aparafusados, como mostra, em detalhes, na Figura 3.7 c e d.

**Figura 3.7. Sistema de fluência convencional com aplicação de carga por alavanca**



(a) detalhe dos sistemas



(b) perspectiva lateral com os 16 ensaios



(c) detalhe do apoio da alavanca de tração



(d) detalhe do apoio da alavanca de punção

## **Garras**

As garras utilizadas no ensaio de fluência convencional são apresentadas na Figura 3.8, com os detalhes das garras de tração e punção. A Figura 3.8a mostra um suporte em funcionamento. Cada suporte apresenta um ensaio de fluência por tração e outro por punção. O conjunto de par de ensaios foi realizado utilizando o mesmo material e nível de tensão. Na Figura 3.8b, o relógio comparador é afixado na parte superior do par de garras e na Figura 3.8c, um exemplar similar encontra-se preso ao sistema de nível. Os relógios comparadores, no início do ensaio, foram ajustados para alcançar deslocamentos máximos que se limitavam a 10 mm e, quando caso se atingisse o limite do curso, fazia-se novo ajuste e nova referência.

**Figura 3.8. Garras do sistema de fluência convencional com aplicação de carga por alavanca**



(a) suporte, alavancas e pesos

(b) garra de tração

(c) garra de punção

## **Fluência Acelerada**

### **Pórtico**

A realização dos ensaios acelerados contemplou grande parte do tempo da tese, compreendendo desde os estudos de revisão bibliográfica até o dimensionamento e montagem. A seguir são apresentados detalhes do procedimento.

## **Estrutura e infraestrutura**

A Figura 3.9 destaca as principais etapas. É possível identificar a fundação composta por 4 estacas de 2,5 m de profundidade (Figura 3.9a) e base construída por módulos de PVC concretado (Figura 3.9b). Em cima da base, têm-se os perfis metálicos “I” e “U”, que completam o travamento do conjunto, que recebe o Equipamento de Saturação e Secagem em base nivelada e aparafusada. O pórtico da Figura 3.9c é um sistema rígido e de baixas deformações. Contém os suportes dos braços de alavanca de tração e punção, além dos rolamentos do sistema de aquisição de dados, os quais já aparecem na Figura 3.9d com a montagem completa.

**Figura 3.9. Resumo das etapas de execução do pórtico**



(a) fundação



(b) base



(c) pórtico de reação

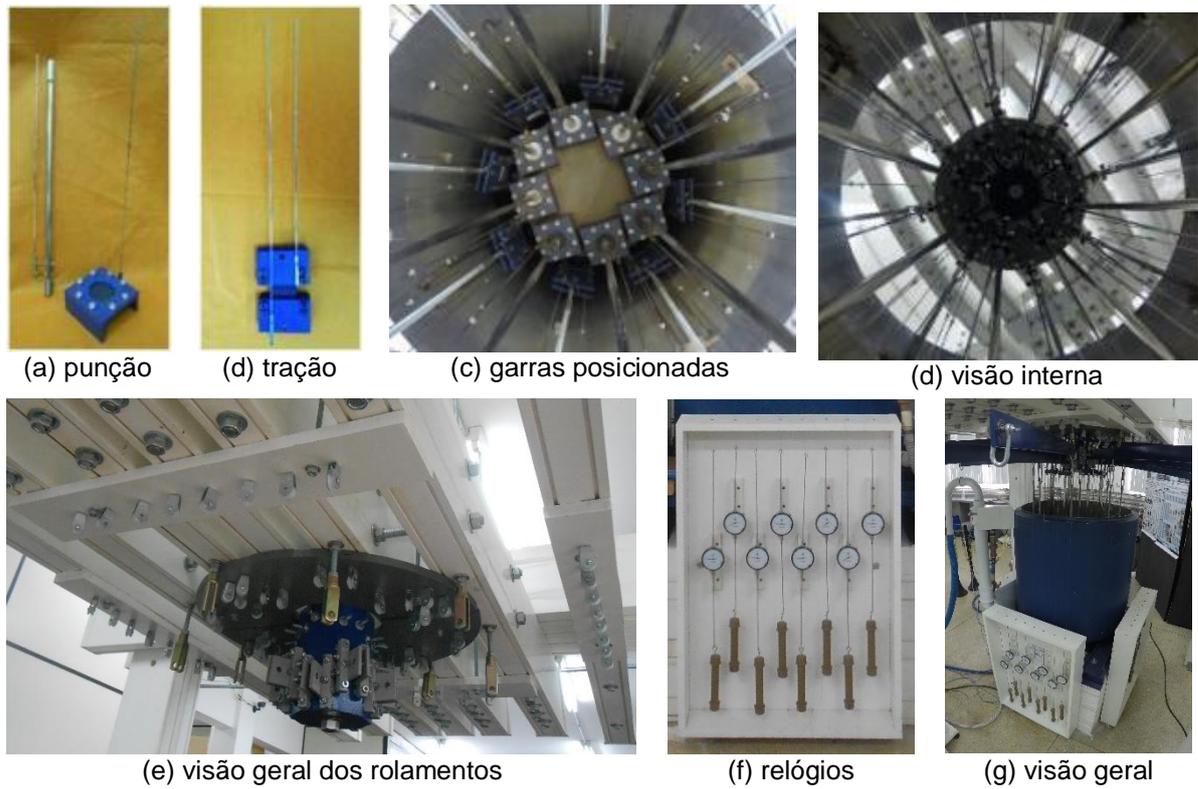


(d) montagem completa

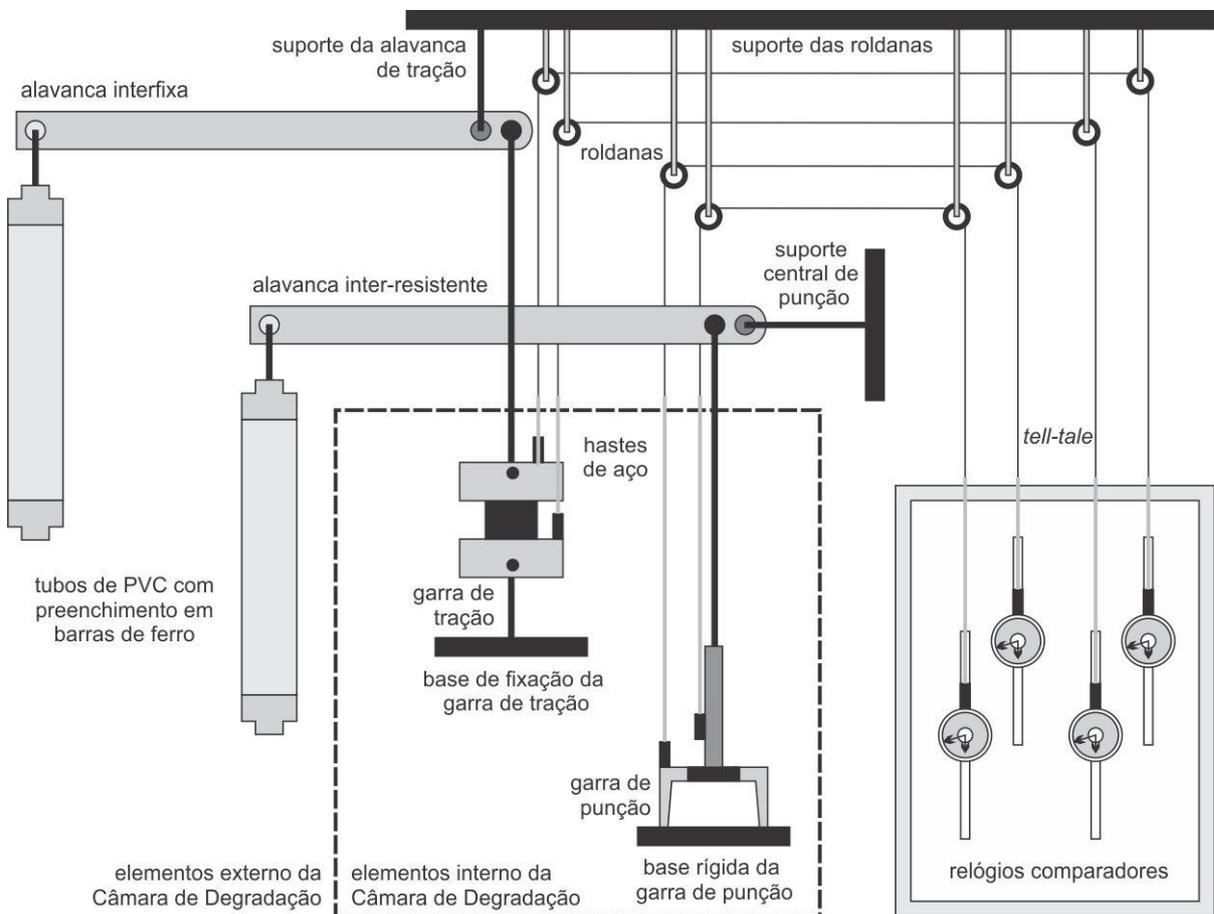
## **Aquisição de Dados**

A Figura 3.10 apresenta o funcionamento do sistema. As garras, ilustradas em nas Figura 3.10 ‘a’ e ‘b’, possuem 2 elementos de aço inox para condução dos fios *tell-tale*. A Figura 3.10 ‘c’ e ‘d’ fornece uma visão interna do equipamento com as garras, estruturas de transmissão de força e aquisição de dados. A Figura 3.10e exibe as roldanas que direcionam o *tell-tale* para as caixas de relógios monitoradas por câmeras da Figura 3.10f. A Figura 3.10g apresenta uma visão geral do sistema de aquisição de dados e a Figura 3.11 um esquemático.

**Figura 3.10. Visão geral e com detalhes do sistema de aquisição de dados**



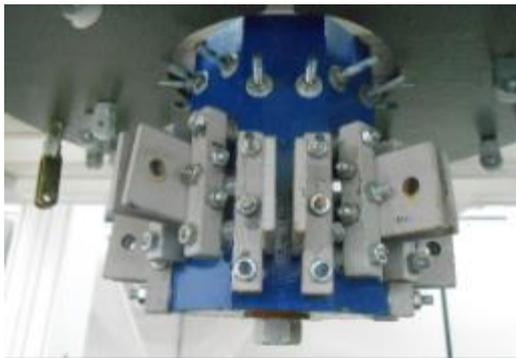
**Figura 3.11. Esquemático do sistema de aquisição de dados**



### **Suporte dos Braços de Alavanca**

O ensaio de fluência acelerada por meio do equipamento de saturação e secagem integrado ao pórtico exigiu uma estrutura de suportes diferenciada ao ensaio de fluência convencional. A Figura 3.12 apresenta o suporte central, com capacidade para 8 alavancas de punção e 8 suportes das alavancas de tração.

**Figura 3.12. Suporte dos braços de alavanca utilizados nos ensaios de fluência no pórtico**



(a) suporte central de punção



(b) suportes das alavancas de tração

### **Garras**

As garras do equipamento de fluência acelerada diferem-se do equipamento de fluência convencional pela aquisição de dados. Na Figura 3.13a têm-se os prismas de metal, fixados nas garras, com uma haste na ponta, que conduzem o *tell-tale* para análise dos deslocamentos. Cada um está ligado a um relógio comparador, ou seja, cada garra foi monitorada por dois relógios, a fim de medir qualquer variação devido à ciclagem no equipamento de saturação e secagem.

**Figura 3.13. Garras do sistema de fluência acelerada**



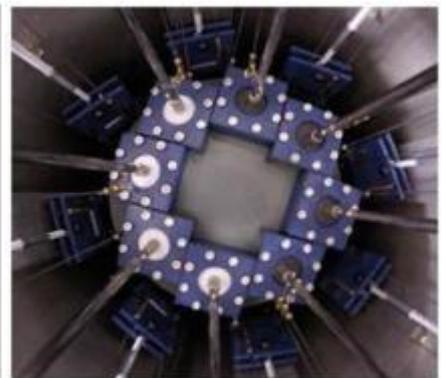
(a) garras posicionadas



(b) tração



(c) punção



(d) 16 garras em ensaio

## ***Sistema de Saturação e Secagem***

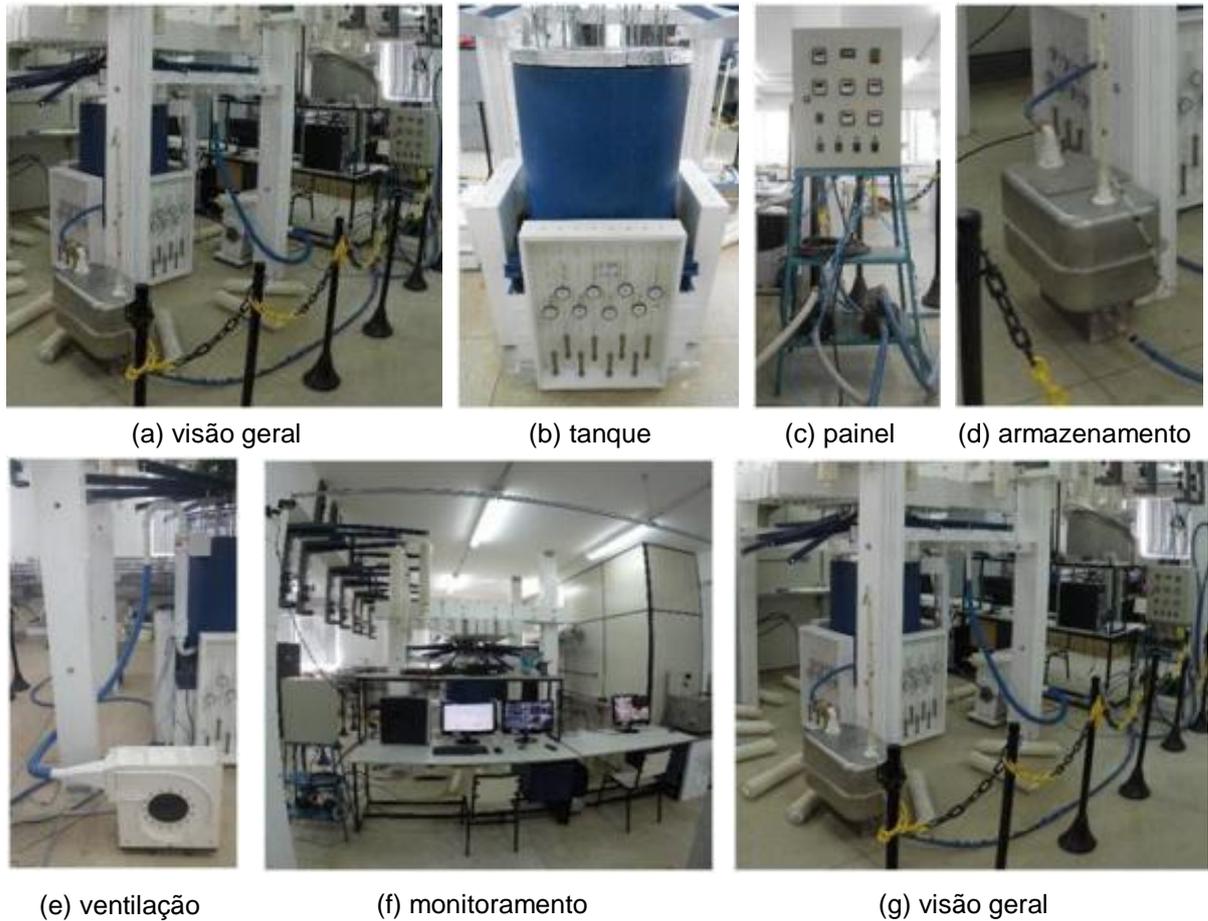
O equipamento de saturação e secagem (Figura 3.14a) foi produzido e apresentado pela primeira vez por Sampaio (2010). Para esta tese, houve a necessidade de adaptação dos componentes para os ensaios de fluência acelerado. A primeira adaptação foi no tanque de saturação e secagem apresentado na Figura 3.14b. Esta parte do equipamento recebeu uma nova tampa, de modo que fosse possível transpassar as hastes necessárias para realizar as medições das deformações dos corpos de prova. Outra novidade foi a base rígida. Além de tornar o fundo do tanque nivelado, foram adicionados furos para fixação do equipamento aos elementos da fundação. Outros furos foram necessários para fixação da base das hastes das garras dos ensaios de fluência na tração.

O painel de controle da Figura 3.14c apresenta os contadores de tempo geral, de saturação, de secagem e de ventilação, e os visores das temperaturas correspondentes aos dois termopares internos ao tanque. Através dele, é determinado como funcionarão os ciclos e quais serão os limites de temperatura do ensaio. Abaixo do painel de controle encontram-se duas bombas. A primeira delas, com mangueiras brancas, é encarregada da sucção de água da caixa d'água e direcionamento ao tanque para saturação dos corpos de prova. A segunda, com mangueiras azuis, realiza o esgotamento do reservatório de armazenamento da Figura 3.14d.

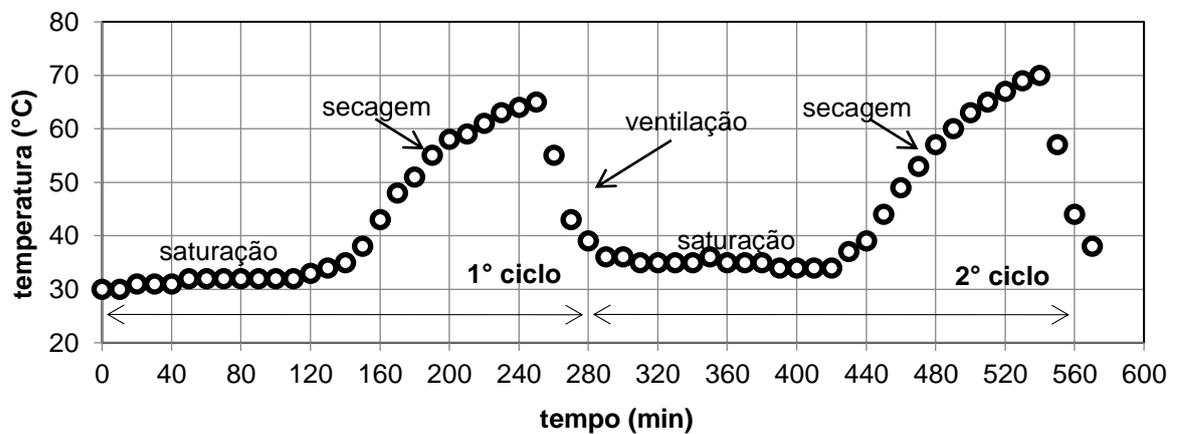
Após o processo de saturação no tanque, tem-se a secagem. Neste momento, a resistência é ligada e assim permanece durante o tempo estabelecido. O próximo procedimento consiste em resfriar o tanque por meio da ventilação para não haver choque térmico entre os ciclos (Figura 3.14e). Sendo assim, após o tempo estabelecido, é retomado o processo de saturação do tanque. Resumidamente, foram estabelecidos 120 minutos de saturação dos corpos de prova com água em temperatura ambiente, 120 minutos de secagem com temperatura máxima de 70° C e 20 minutos de ventilação. Para finalizar a soma do tempo de um ciclo de ensaio, têm-se mais 20 minutos. De acordo com Pinto (2006), os períodos de 120 minutos de submersão ou de secagem garantem, respectivamente, a saturação ou secagem para os geotêxteis. Sendo necessários 8 minutos para encher o tanque e 12 para esvaziar. O Equipamento de saturação e secagem finaliza um ciclo com tempo total de 280 minutos. A Figura 3.14f apresenta o sistema de monitoramento ao lado do painel de controle. Os registros ficaram gravados para aquisição dos dados em qualquer

momento do ensaio e registro do movimento em torno do equipamento. A Figura 3.14g é uma visão geral da estrutura do ensaio. A Figura 3.15, por sua vez, apresenta a calibração da câmara de degradação com a variação de temperatura durante algumas horas dos ciclos de saturação e secagem.

**Figura 3.14. Sistema de Saturação e Secagem**



**Figura 3.15. Calibração da Câmara de Saturação e Secagem**



## ***Dimensionamento***

O pórtico foi projetado para receber as reações de apoio de 16 alavancas. Com a geometria do posicionamento das garras, e conseqüentemente, o posicionamento das alavancas, definiu-se a posição dos pilares e as vigas.

Foi encontrada deformação máxima de 1,49 mm para dimensionamento, admitindo carga de fluência de até 70% do valor de ruptura de geossintéticos com resistência a tração de 300kN/m, ou seja, 1500 kg em cada reação de apoio. Considerado os valores máximos de carga utilizados nesta tese, tem-se 0,23 mm de deformação na viga central.

### ***3.3.2 Outros Equipamentos***

#### ***Prensa***

A máquina universal de ensaios tem capacidade de 30kN (Figura 3.16a) e foi utilizada para a realização dos ensaios de caracterização dos geotêxteis. Foram os ensaios de resistência à tração e ao puncionamento, bem como o de punção com confinamento utilizando as diversas garras do laboratório (Figura 3.17).

#### ***Ultravioleta***

A Figura 3.16b mostra o equipamento C-UV B disponível no LED-LECIV-UENF. Neste equipamento, os corpos de prova são submetidos a ciclos de condensação e à exposição à radiação ultravioleta. O ciclo adotado para degradar os geotêxteis, baseado na norma ASTM G154, contém 4 horas de radiação ultravioleta a 50° C, seguido de 4 horas de condensação a 50° C, com um tempo de ventilação de 10 minutos. Ressalta-se que a temperatura ambiente foi mantida igual a 21° C. O equipamento C-UV B possui dois bancos de radiação ultravioleta com 4 fontes de radiação em cada um, num total de 8 fontes de luz. Esses bancos são colocados no sentido longitudinal do aparelho onde estão localizados os suportes dos corpos de prova que foi adaptado para receber, em cada lado, 4 amostras com largura igual 28,5 mm e comprimento igual a 59 cm, com comprimento de exposição de 30 cm. Cada amostra produziu 6 corpos de prova de punção e 6 de tração.

Produziram-se 12 amostras de cada geotêxtil somando todos os ciclos com limite de 6 pares de lâmpadas UVB, o que gerou 600 ciclos, equivalente a 2400 horas de exposição aos raios UVB ou 4800 horas de exposição à condensação e radiação. Os ciclos definidos para teste foram de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 25, 50, 100, 130, 270 e 600.

As lâmpadas são substituídas quando atinge 60 % de sua capacidade inicial, o que ocorre em 1.600 horas de exposição à radiação ultravioleta, aproximadamente. Um rodízio é feito substituindo as lâmpadas mais velhas, uma de cada lado a cada 400 horas, mantendo-se uma média de radiação constante e sem alteração substancial durante o tempo em que se processa a degradação.

### ***Microscópio***

O equipamento utilizado é o LEXT OLS4000 3D *Measuring Laser Microscope* (Figura 3.16c) desenvolvido para análise de imagem a nível nanométrico, com medições da rugosidade. O equipamento permite ampliações de 108 a 17280 vezes com microscópio óptico e a laser. Utilizaram-se imagens com as lentes de 5, 20 e 50 vezes, que permitem visualização em escala em 400, 100 e 40 micrometros.

### ***Espectrofotômetro***

#### ***Absorção na região do UV-Vis***

Nas análises realizadas no espectrofotômetro da Shimadzu UV-1800 (Figura 3.16), foram conhecidas as regiões do espectro eletromagnético no qual os geotêxteis absorvem a energia irradiada. Esta análise foi realizada no LCQUI – UENF. A varredura foi realizada de 190 – 1100 nm (Figura 3.16d).

#### ***Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR***

A espectroscopia foi utilizada na identificação da estrutura molecular dos geotêxteis. As análises foram realizadas em um espectrofotômetro da Shimadzu IRAffinity-1 com faixa espectral de 4000 a 500  $\text{cm}^{-1}$  (Figura 3.16e).

## Garras

Neste projeto, foram utilizadas 12 garras para todos ensaios de caracterização em vários tipos de ensaios. A Figura 3.17 apresenta os modelos utilizados. A maior parte das garras é metálica e com parafusos (Figura 3.17 a, b, c, d, e, f, g, h e i). As faces internas, que entram em contato com a amostra, são revestidas por lixa de aço n° 80 para melhorar o atrito com o material. Elas funcionam por aperto ao redor das amostras, com exceção das garras apresentadas nas Figura 3.17 j, k e l, com aperto especificado em legenda. Elas foram utilizadas como forma de avaliar as interferências de resultados geradas por garras com características diferentes.

Figura 3.16. Equipamentos utilizados



(a) prensa de ensaio universal



(b) equipamento de radiação ultravioleta



(c) microscópio óptico

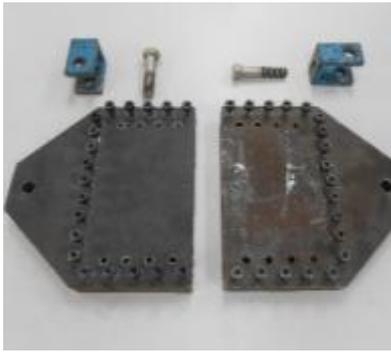


(d) espectrofotômetro FTIR

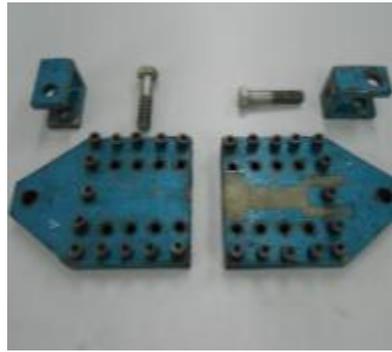


(e) espectrofotômetro UV-Vis

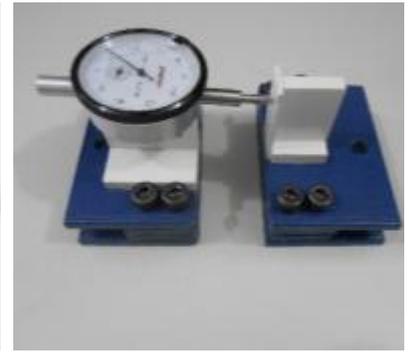
**Figura 3.17. Garras utilizadas na tese**



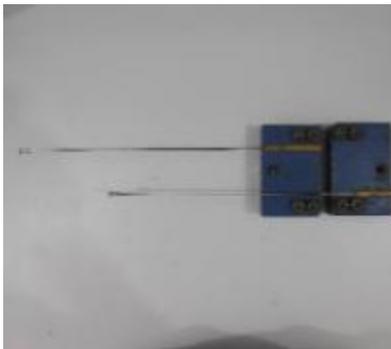
(a) faixa larga



(b) faixa estreita



(c) fluência convencional



(d) fluência acelerada



(e) ensaio CBR padrão



(f) mini CBR



(g) garra micro CBR



(h) fluência convencional



(i) fluência acelerada



(j) aperto frontal



(k) aperto pneumático



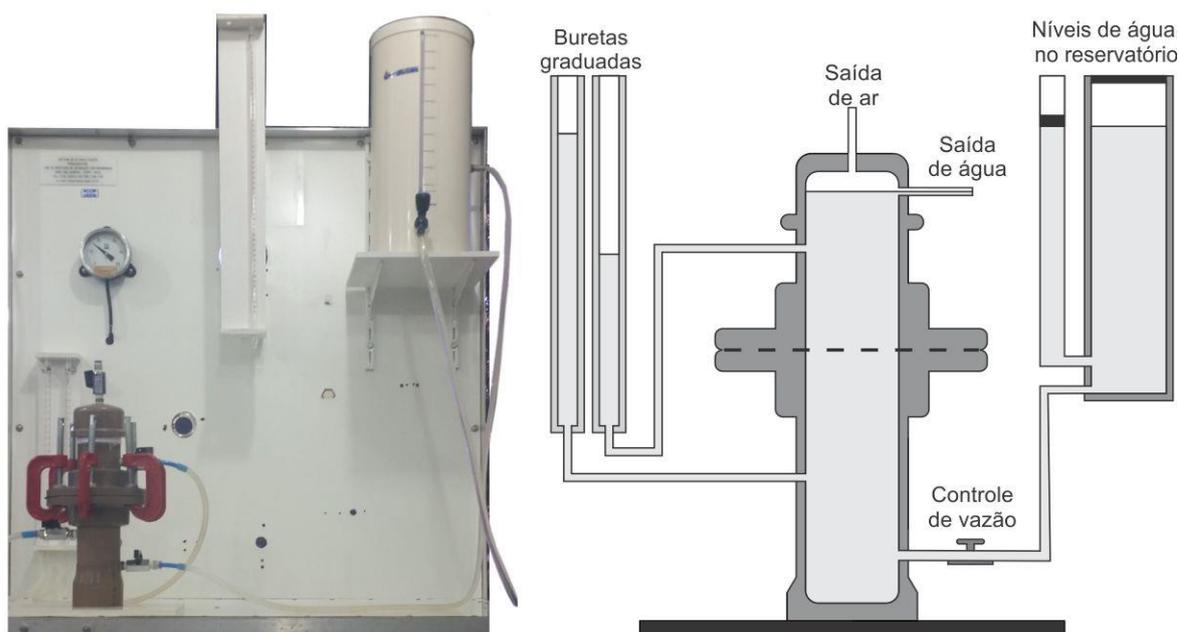
(l) aperto mecânico

## **Permeabilidade**

A Figura 3.18 apresenta o equipamento e esquemático para realização do ensaio. Nestas funções, os geossintéticos, principalmente os geotêxteis tecidos, devem permitir um fluxo de água perpendicular ao seu plano. A permeabilidade depende basicamente da estrutura dos geossintéticos, ou seja, suas propriedades físicas, e não menos importante, está ligada a propriedade de abertura de filtração.

A permeabilidade normal ao plano, cuja unidade é em  $m.s^{-1}$ , muitas vezes é expressa em termos de permissividade, de unidade  $s^{-1}$ . A permissividade se obtém através da divisão do coeficiente de permeabilidade normal ao plano pela espessura do geossintético. Pode-se avaliar esta propriedade analisando casos onde seja necessário obter resultados com carga constante ou carga variável.

**Figura 3.18. Esquemático e equipamento de permeabilidade**

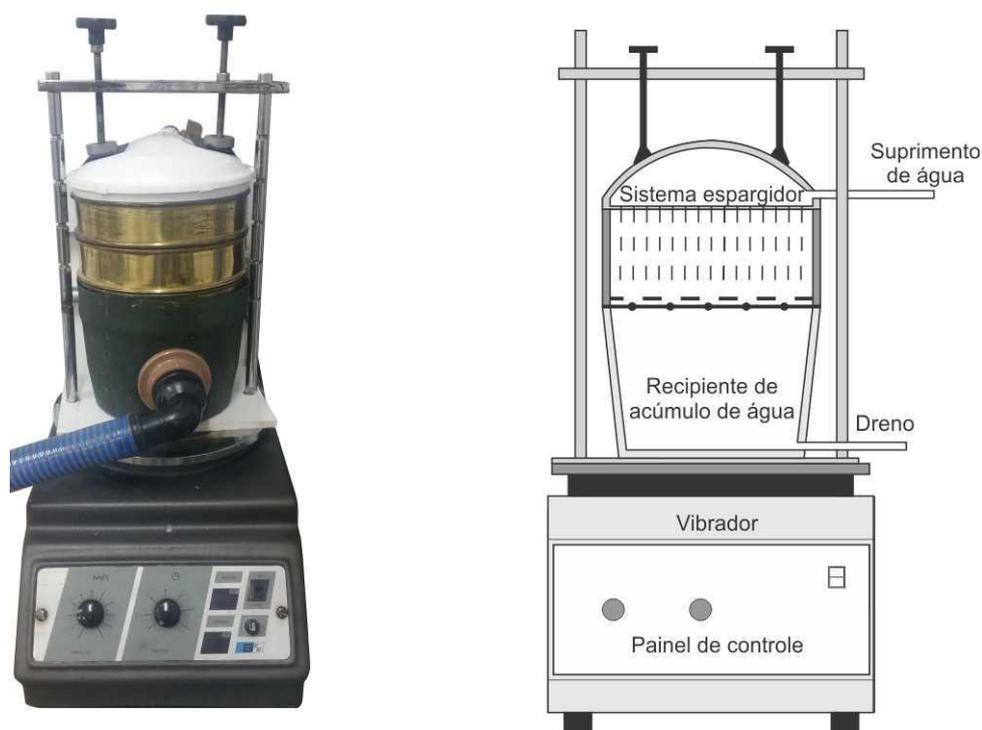


## **Abertura de Filtração**

O método para determinação da abertura de filtração característica de uma camada única de um geotêxtil é realizado com utilização de material arenoso em intervalos fixados por norma. Neste ensaio, utilizou-se granulometria de quartzo fragmentado no moinho de bolas do LECIV-UENF.

A Figura 3.19 apresenta o esquemático e equipamento de abertura de filtração desenvolvido nesta pesquisa. Neste ensaio, a amostra de geossintético é colocada sob uma grade metálica e abaixo de um sistema espargidor. Logo em seguida o solo é depositado sobre os geotêxteis. O ensaio começa com o conjunto sendo submetido ao sistema espargidor durante 10 minutos em um peneirador vibrando na frequência normatizada de 0,25 Hz. Posteriormente, avaliam-se as possíveis perdas de material granular no sistema, somando material retido e o material passante, que se encontra no recipiente de acúmulo de água. O material passante é peneirado e determina-se o diâmetro da abertura dos geotêxteis referente a 90% deste material.

**Figura 3.19. Esquemático e equipamento de permeabilidade abertura de filtração**



### 3.4 Metodologia de Ensaio

A seguir são descritos os procedimentos de ensaios e as principais considerações a respeito da caracterização dos geotêxteis tecidos estudados na tese, o que foi apresentado na Tabela 2.9 do Capítulo 2 com as principais considerações, e detalhes que serão utilizados para os resultados.

### 3.4.1 Ensaio de Caracterização Física

Foram destacados 5 ensaios de classificação dos geotêxteis. A Tabela 3.3 exibe como estes ensaios procedem até a obtenção dos resultados, com número de corpos de provas (CP), parâmetros obtidos e o objetivo.

**Tabela 3.3: Características dos ensaios de propriedades físicas em geotêxteis tecidos**

Ensaio	Características	Parâmetros	Objetivo
Gramatura	São usados 10 CP com área superior a 100 cm <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	Calcular a densidade
Espessura nominal	Mede-se a distância entre duas placas rígidas paralelas sob tensão de 2±0,01 kPa em 10 CP	mm	Determinar a espessura sob tensão
Porosidade	Relação entre o volume dos poros e o volume total	%	Avaliar a quantidade de vazios do material
Microscopia	Avalia-se qualitativamente uma amostra representativa em relação a sua integridade física	-	Visualizar estado físico
Espectrofotometria	Observação do comportamento da amostra com fonte de energia com emissão ou absorção de radiação	Transmitância (%) Absorbância (adimensional)	Quantificar radiação

### 3.4.2 Ensaio de Caracterização Mecânica

Destacaram-se os 3 ensaios mais utilizados e que estão nesta pesquisa para ajudar na caracterização dos geotêxteis. Resumidamente, a Tabela 3.4 enumera os principais procedimentos de todos os ensaios para a obtenção dos resultados, os parâmetros obtidos e o seu objetivo. Estas análises são destrutivas e não permitem uma caracterização posterior. A seguir, são expostas também as variações destes ensaios e a metodologia praticada.

**Tabela 3.4: Características dos ensaios de propriedades mecânicas em geotêxteis tecidos**

Ensaio	Características	Parâmetros	Objetivo
Tração direta	5 CP. Pré-carga de 1% e taxa de deformação de 20±5%/min da distância entre referências medida na amostra	Resistência (kN/m) Rigidez (kN/m) Deformação (%)	Determinar a resistência mecânica
Puncionamento	5 CP. Pré-carga de 20N e taxa de deformação de 50±5mm/min	Força (kN) Deslocamento (mm)	Determinar a força de perfuração na ruptura
Fluência	Na deformação: 4 CP com carregamento entre 5 e 60% durante 1008h	Deformação (%) Tempo (h)	Determinar a deformação por fluência

### **Ensaio de Tração Direta**

O ensaio foi realizado com faixas estreitas com largura de 50±5 mm, entre garras de 25 mm e taxa de deformação de 5 mm/min. As garras, com destaque nesta tese, que já foram apresentadas, são constituídas por placas metálicas com aperto ao redor da amostra realizado por parafusos e a face interna em contato com o geotêxtil possui uma lixa #80.

### **Ensaio de Punção**

Através deste ensaio, determinou-se a tração indireta como resposta do ensaio. A garra utilizada corresponde ao suporte CBR mini com dimensões 3 vezes menor que o CBR normatizado. A velocidade manteve-se em 50mm/min. Com da geometria do corpo de prova e do raio do pistão utilizado ( $r$ ), Cazzuffi et al (1986), Murphy e Koerner (1988) e Dias Filho et al (2014b) apresentam uma alternativa para cálculo da resistência à tração indireta ( $\sigma$ ) dividindo a carga de ruptura ( $F$ ) pelo perímetro do pistão ( $P$ ). A Equação 4 mostra esta proposta.

$$\sigma = \frac{F}{P} = \frac{F}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [4]$$

Bergado et al (2001) e Atmatzidis et al (2006) propõem uma análise da resistência à tração indireta levando em consideração a inclinação do geotêxtil ( $\alpha$ ) ao longo do carregamento e, conseqüentemente, a decomposição da força. O método, apresentado pela Equação 5, revela valores de resistência superiores ao proposto anteriormente e mostrou-se a melhor forma de obter esse parâmetro.

$$\sigma = \frac{F}{\cos\alpha \cdot P} = \frac{F}{\cos\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r} \quad [5]$$

Cazzuffi et al (1986) e Murphy e Koerner (1988) apresentam, também, dois métodos de cálculo da deformação usados na Europa: a norma alemã e a italiana. De acordo com o método alemão, a deformação é calculada pela razão da diferença dos comprimentos final ( $L_f$ ) e inicial ( $L_i$ ) pelo comprimento inicial. É considerado um formato linear para o geossintético e o comprimento final é calculado pelo Teorema de Pitágoras, levando em conta o deslocamento na ruptura ( $d$ ). Na Equação 6, tem-se o método de cálculo alemão para a deformação.

$$\varepsilon_{alema} = \frac{L_f - L_i}{L_i} \cdot 100 = \frac{\sqrt{L_f^2 + d^2} - L_i}{L_i} \cdot 100 \quad [6]$$

A expressão que calcula a deformação pelo método italiano relaciona o raio da amostra ( $R$ ), o raio do pistão ( $r$ ) e o comprimento final do corpo de prova ( $L_f$ ) e é representada pela Equação 7. O comprimento final é calculado da mesma forma que a norma alemã.

$$\varepsilon_{italiana} = \frac{[\pi \cdot (R + r) \cdot L_f + \pi \cdot (r^2 - R^2)]}{\pi \cdot R^2} \cdot 100 \quad [7]$$

Comparando as duas deformações para um mesmo deslocamento, a norma alemã apresenta valor superior à norma italiana. Porém, sabendo que este cálculo não tem boa representatividade, através de pesquisas, encontrou-se um método que se adequou a geometria do corpo de prova e gerou resultados mais precisos.

### **Método de Kirchhoff**

Considerando a configuração do ensaio de puncionamento, foi feito um ajuste do modelo de Kirchhoff de placas circulares finas engastadas submetidas a um carregamento uniformemente distribuído.

A amostra de geossintético corresponde à placa circular fina e o carregamento é realizado pelo pistão. O cálculo do deslocamento para pontos entre o limite de pistão e o suporte do corpo de prova é dado pela Equação 8.

$$w = \frac{F \cdot r^2}{16 \cdot D} \cdot \left[ \frac{(R^2 - x^2) \cdot (2 \cdot R^2 + r^2)}{2 \cdot R^2} + (R^2 + 2 \cdot x^2) \cdot \ln \frac{x}{R} \right] \quad [8]$$

$w$  = deslocamento do ponto

$x$  = distância do ponto ao centro da amostra

$F$  = carga

$r$  = raio do pistão

$R$  = raio da amostra

$D$  = módulo de rigidez a flexão

Utilizando o deslocamento e a carga obtidos pelo ensaio de funcionamento e, levando em consideração um ponto no limite do pistão com o corpo de prova, ou seja, posição do ponto ( $x$ ) igual ao raio do pistão ( $r$ ), pode-se obter o valor do módulo de rigidez à flexão ( $D$ ) a partir da Equação 9.

$$D = \frac{F \cdot r^2}{16 \cdot w} \cdot \left[ \frac{(R^2 - r^2) \cdot (2 \cdot R^2 + r^2)}{2 \cdot R^2} + (R^2 + 2 \cdot r^2) \cdot \ln \frac{r}{R} \right] \quad [9]$$

Conhecido o valor do módulo de rigidez à flexão ( $D$ ), pode-se calcular o deslocamento em qualquer ponto do geossintético.

A deformação, assim como na norma alemã, é calculada pela razão da diferença dos comprimentos final ( $K_f$ ) e inicial ( $K_i$ ) pelo comprimento inicial. O comprimento final da amostra de geossintético é determinado utilizando conceitos de cálculo diferencial e integral para comprimento de uma função. As equações 10, 11 e 12 apresentam o cálculo da deformação e do comprimento final do corpo de prova.

$$\varepsilon_{kirchhoff} = \frac{K_f - K_i}{K_i} \cdot 100 \quad [10]$$

$$K_f = \int_r^R \sqrt{1 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} \partial x \quad [11]$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{F \cdot r^2}{16 \cdot D} \cdot \left( \frac{r^2}{x} + 4 \cdot r \cdot \ln \frac{r}{R} - \frac{r^2 \cdot x}{R^2} \right) \quad [12]$$

As deformações previstas por método de Kirchhoff são mais representativas do que as deformações calculadas pelas normas alemã e italiana. Esta metodologia torna o cálculo de deformações mais real e próximo ao obtido pelo ensaio de tração direta.

O método mostra que é possível calcular o deslocamento vertical de cada ponto do corpo de prova entre o limite do pistão e o suporte da amostra. Para uma comparação entre os valores de deslocamentos calculados de forma analítica e o comportamento da amostra no ensaio, foi feita uma medição dos deslocamentos verticais em diferentes pontos com o auxílio de pregos em um suporte de PVC. O procedimento consistiu em parar o ensaio e, utilizando os pregos, medir a distância do suporte até o corpo de prova (Figura 3.20). Os gráficos da Figura 3.21 apresentam a deformada calculada de forma analítica e os valores medidos experimentalmente com o uso dos pregos.

Figura 3.20. Procedimento de validação do método de Kirchhoff com uso de pregos

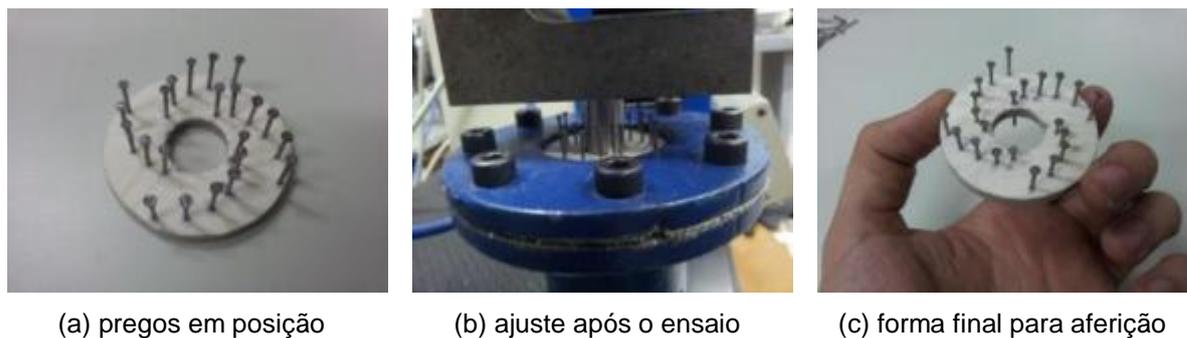
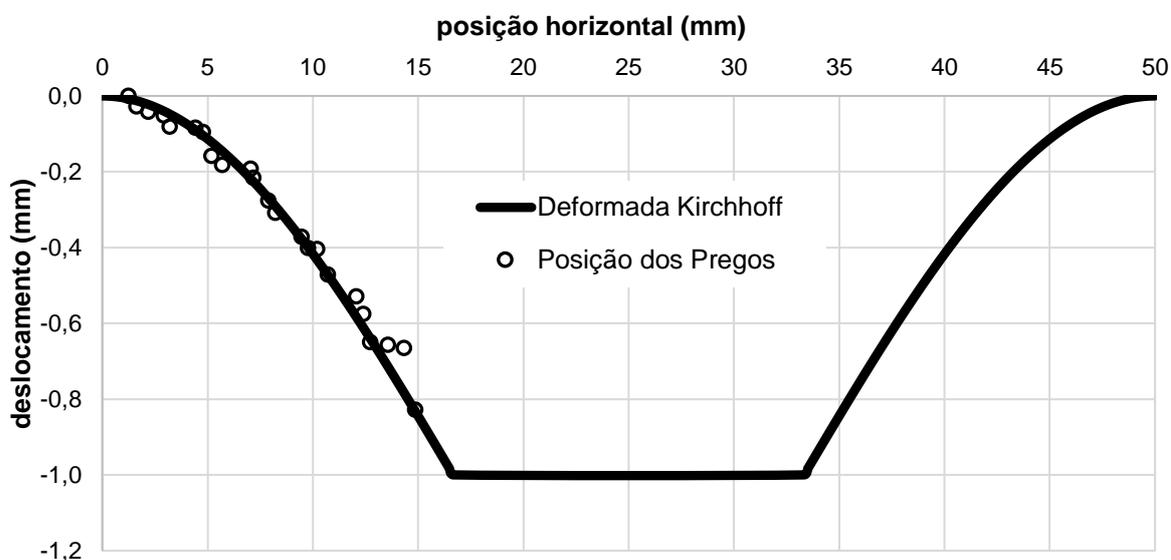


Figura 3.21. Curva normalizada do ensaio de validação do Método de Kichhoff com pregos



### ***Ensaio de Fluência na Tração***

O ensaio procedeu conforme prescrito em norma. Os corpos de prova utilizados possuem largura de  $50 \pm 5$  mm e, entre garras, de 25 mm, conforme os ensaios de tração direta, a qual obteve contração lateral inferior aos 10%. O carregamento obedeceu ao critério de ser realizado dentro de 1 minuto. Entretanto, como foi observado por Trentini (2005), dependendo da rigidez em questão, isso representa uma taxa de deformação superior à sugerida pelas normas de tração direta, que é de 20% da distância entre dois pontos marcados nos corpos de prova por minuto. Desta forma, ficou claro que o carregamento gerou cargas dinâmicas e problemas de interpretação. A solução foi a utilização de um carregamento contínuo e lento dentro do tempo de um minuto.

Para análises posteriores, foi utilizado modelo de uma equação logarítmica, que é representada pela Equação 13. A mesma foi reescrita de forma a se enquadrar à simbologia dos parâmetros envolvidos no ensaio, que são deformação e tempo (Equação 14).

$$y = a \ln(x) + b \quad [13]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\theta} \ln(t) + \varepsilon_i \quad [14]$$

Sendo assim, as deformações podem ser obtidas. Na primeira parcela, o multiplicador  $\varepsilon_{\theta}$  corresponde ao índice de fluência, que representa a inclinação da curva formada pela deformação com o carregamento constante aplicado. Na segunda parcela,  $\varepsilon_i$  corresponde à deformação inicial. De acordo com os dados, para demonstração do modelo desenvolvido, estas parcelas foram colocadas em função das tensões do carregamento em cada estágio do ensaio de fluência (Equação 15).

$$\varepsilon = c.T^d.\ln(t) + e.T \quad [15]$$

O comportamento observado no trabalho e na literatura possibilita admitir a primeira parcela da curva com comportamento exponencial. Esta observação traduz uma característica de, nos ensaios de fluência em geotêxteis tecidos, a inclinação das curvas mudarem gradualmente com o aumento da tensão no corpo de prova. Já na segunda parcela, a deformação inicial comporta-se de forma crescente e linear.

### ***Ensaio de Fluência na Punção***

Neste ensaio foram utilizadas as metodologias do ensaio de puncionamento e ensaio de fluência na tração. Foram utilizados suportes em escala reduzida com corpos de prova de 50 mm de diâmetro e pistão de, aproximadamente, 17 mm.

### ***Ensaio de Fluência Acelerada - Degradação Simultânea***

O equipamento utilizado neste processo foi de saturação e secagem. Na revisão bibliográfica, ele foi o procedimento apresentado que mais acelerou a degradação nos geotêxteis. O principal objetivo da degradação simultânea é representar as condições de campo de forma mais apropriada.

### 3.4.3 Ensaio de Caracterização Hidráulica

Os ensaios só foram possíveis através da construção dos equipamentos no LED para caracterização dos geossintéticos (Tabela 3.5). O equipamento de transmissividade está em fase de construção e não participou dos resultados. A caracterização destas propriedades possibilita interpretar melhor o comportamento dos geotêxteis quando aplicado em obras hidráulicas e permite encontrar melhor forma de dimensionamento.

**Tabela 3.5: Características dos ensaios de propriedades hidráulicas em geotêxteis tecidos**

Ensaio	Características	Parâmetros	Objetivo
Permissividade	5 corpos de prova. Avaliação com 50 mm de carga hidráulica	$k_n$ (m/s) $\psi$ (s <sup>-1</sup> )	Determinar a velocidade de fluxo
Abertura de Filtração	4 corpos de prova. 10 min em peneirador. Pesou-se o solo retido e o passado pelo geotêxtil, o qual passa por ensaio de peneiramento	O <sub>90</sub> (mm)	Determinar a dimensão correspondente a 90% das do solo passado no geotêxtil

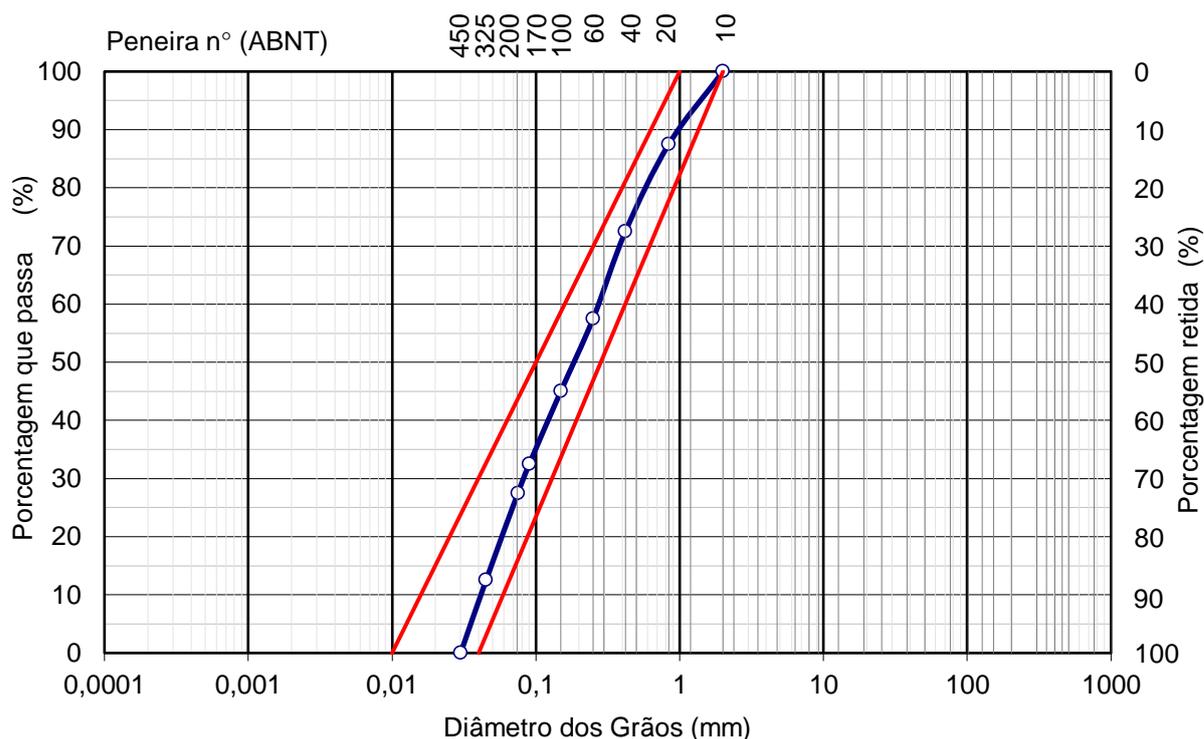
#### **Permissividade**

É a relação entre a permeabilidade normal ao plano do produto pela espessura. A carga hidráulica é utilizada em 5 alturas diferentes para todos os corpos de prova a fim de avaliar possível alteração. A norma estabelece estas características e os procedimentos de interpolação do resultado final.

#### **Abertura de Filtração**

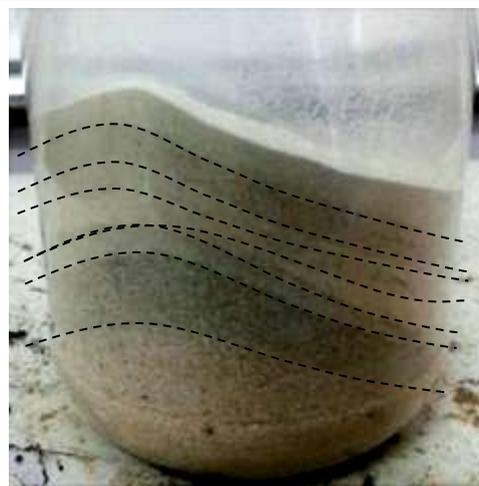
Corresponde ao diâmetro referente a 90% do material passante do ensaio de abertura de filtração. Neste ensaio, foi utilizado material granular formado de quartzo fragmentado no moinho do Laboratório de Engenharia Civil. O material foi peneirado na finalidade de obter a faixa granulométrica desejada segundo a norma, como mostram a Figura 3.22 e a Tabela 3.6. A quantidade de solo segue a proporção de 7kg/m<sup>2</sup> e foram separados em amostras individuais contendo 266,09g para cada corpo de prova de 22 cm de diâmetro.

**Figura 3.22. Intervalo granulométrico do solo usado no ensaio**



**Tabela 3.6: Pesos referentes ao solo usado no ensaio no conjunto de peneiras utilizado**

Abertura da peneira ABNT		Material do CP (g)
#	(mm)	
10	2,00	-
20	0,84	33,26
40	0,425	39,91
60	0,25	39,91
100	0,149	33,26
170	0,09	33,26
200	0,074	13,30
270	0,045	39,91
450	0,03	33,26
TOTAL		266,07



### **3.4.4 Ensaio de Caracterização do Desempenho**

Na Tabela 3.7 encontram-se os 2 ensaios utilizados. Foram avaliados os materiais através da punção confinada e resistência à radiação ultravioleta. Levando em consideração as possíveis ações exógenas, às quais as FTT são susceptíveis, estes ensaios destacam-se por ser uma ação presente em toda sua vida útil.

**Tabela 3.7: Características dos ensaios de desempenho em geotêxteis tecidos**

Ensaio	Características	Parâmetros	Objetivo
Punção confinada	5 CP. 4 densidades diferentes em 2 tipos de solo	Força (kN) Deslocamento (mm)	Determinar a força de perfuração na ruptura
Radiação Ultravioleta	5 CP para cada ciclo e tipo de ensaio	Variam de acordo com os ensaios de caracterização	Determinar parâmetros após o procedimento de degradação

### ***Ensaio de Punção Confinada***

Foi avaliado o comportamento dos materiais envolvidos. Os geotêxteis foram ensaiados nas 3 garras apresentadas para realizar ensaios de puncionamento e foram utilizados dois solos arenosos de origens diferentes. Utilizaram-se areia de rio e do mar com densidades diferentes no suporte.

Os materiais de origens distintas foram utilizados para possíveis aplicações em FTT. A areia do mar utilizada neste projeto pertence à dragagem localizada no complexo portuário de Distrito do Açú, em São João da Barra, norte do Estado do Rio de Janeiro. Já a areia, foi do rio Paraíba do Sul, localizado perto da UENF. As Tabela 3.8 e Tabela 3.9 apresentam quatro densidades de materiais utilizados no interior do suporte para testes CBR. As areias foram lançadas dentro do suporte usando forma padrão para obter regularmente a mesma densidade destinada para repetir a experiência em cada um dos geotêxteis tecidos utilizados. A caracterização das areias está definida nas Figura 3.23 e Figura 3.24.

**Tabela 3.8: Densidade da areia do mar**

Condição da Areia	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
d <sub>0</sub> - Sem areia	-
d <sub>1</sub> - Densidade Mínima	1,530
d <sub>2</sub> - Densidade Intermediária menor	1,592
d <sub>3</sub> - Densidade Intermediária maior	1,653
d <sub>4</sub> - Densidade Máxima	1,715

**Tabela 3.9: Densidade da areia do rio**

Condição da Areia	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
d <sub>0</sub> - Sem areia	-
d <sub>1</sub> - Mínimo	1,395
d <sub>2</sub> - Intermediária menor	1,472
d <sub>3</sub> - Intermediária maior	1,550
d <sub>4</sub> - Máxima	1,627

Figura 3.23. Granulometria da areia do mar

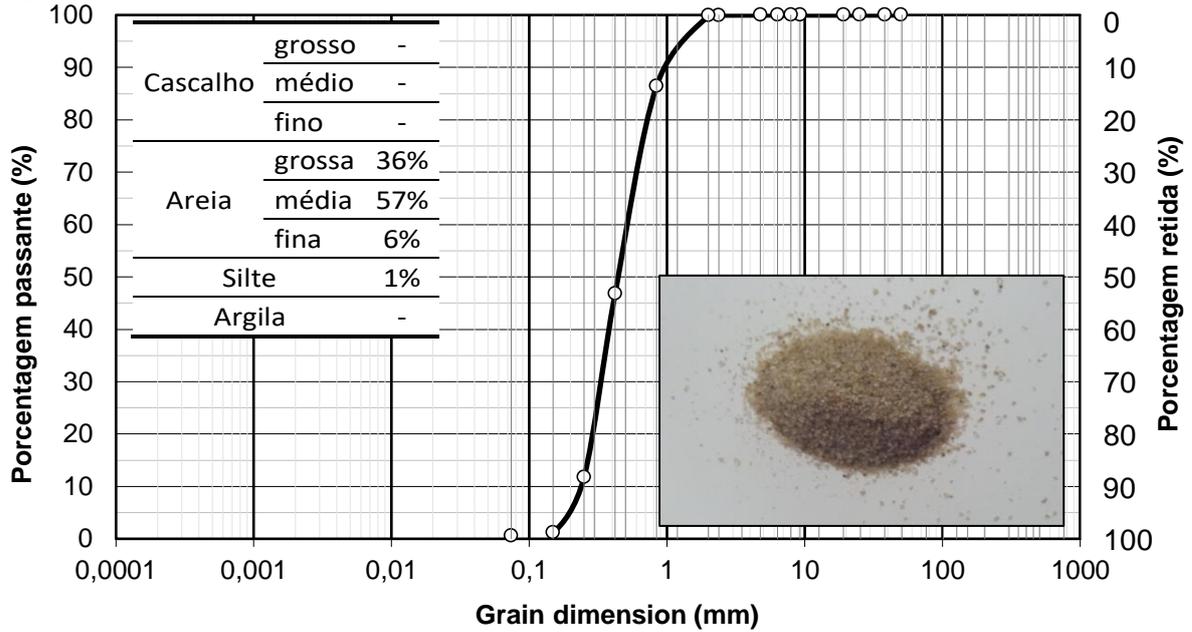
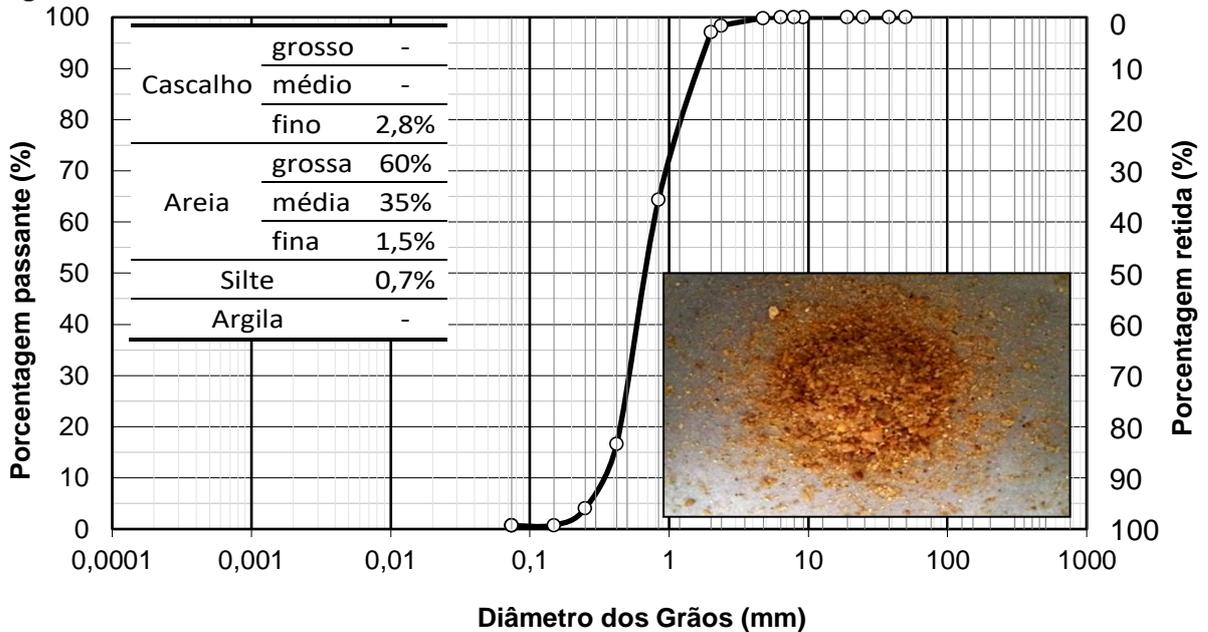


Figura 3.24. Granulometria da areia do rio



### Radiação Ultravioleta

Com a exposição a degradação ultravioleta, diversos parâmetros podem ser obtidos. O material degradado foi submetido a ensaios não destrutivos e destrutivos. Realizaram-se primeiramente os ensaios de caracterização física de gramatura, espessura, porosidade, microscopia e espectrofotometria e, depois, os ensaios de caracterização mecânica de tração, puncionamento e fluência.

### **3.4.5 Ensaio de Caracterização da Durabilidade**

A durabilidade é fonte de estudo em diversas áreas onde há materiais aplicados na Engenharia Geotécnica. Os projetos dimensionados necessitam materiais de qualidade para que eles possam servir por muitos anos sem comprometimento.

A revisão bibliográfica permitiu avaliar as melhores formas de quantificar a durabilidade com discussões, normas e autores que avaliaram a durabilidade de materiais geotécnicos, incluindo os geossintéticos. Resumidamente, as formas de obtenção de parâmetros e estimar o tempo de vida útil dos materiais são por meio de exumação, ensaios de fluência na ruptura, limites de deformação ou projeções de ruptura com ensaios de fluência na deformação, exposição prolongada no campo, degradação em laboratório e correlação entre degradação natural no campo e acelerada em laboratório.

#### ***Degradação no Campo***

A exposição às condições climáticas natural tem como vantagem expor as amostras de geotêxteis tecidos na mesma proporção e da mesma forma que estariam em uma condição real de aplicação. O procedimento de degradação ocorreu no terraço de um dos prédios da UENF (Figura 3.25) em Campos dos Goytacazes, localizado no Norte do Estado do Rio de Janeiro.

As amostras foram instaladas em suporte com inclinação de  $21^{\circ}48'$ , de acordo com a latitude local,  $21^{\circ}48'14''$  S e  $41^{\circ}19'26''$  W, com base virada para Norte. Este procedimento garante maior incidência solar e, conseqüentemente, maior radiação em contato com os geotêxteis. Os suportes foram instalados com as amostras no período de agosto de 2013 até agosto de 2015. As condições climáticas da região durante a exposição natural com temperatura média máxima de  $31^{\circ}$  C e a mínima média foi de  $20^{\circ}$ . A altitude local é de 14m e a instalação dos pórticos no terraço encontra-se a 11m. Foram 180 dias de precipitação, com valor acumulado de 2165 mm, unidade relativa média de 79%. Radiação solar máxima acumulada no mês de 700 MJ/m<sup>2</sup> e 13 GJ/m<sup>2</sup> foi a radiação solar acumulada em 2 anos de análise.

**Figura 3.25. Campo experimental da UENF**



(a) visão geral



(b) detalhe do terraço e pórticos

### ***Degradação no Laboratório***

Os equipamentos de degradação acelerada no laboratório foram apresentados. Foi utilizado o equipamento de condensação e radiação ultravioleta com a intenção de avaliar o comportamento dos geotêxteis com o tempo de exposição no laboratório e poder correlacionar com a degradação natural no campo.

#### ***3.4.6 Parâmetros do Ensaio de Caracterização da Durabilidade***

A criação de parâmetros de durabilidade se concretizou com a publicação de Dias Filho et al (2006b). Para isso, são apresentadas as formas de se caracterizar o material através do índice, da curva e do modelo.

### ***Índice***

Após a degradação das amostras pelos processos de degradação de campo e laboratório, realizam-se ensaios de caracterização em tempos específicos de degradação para verificar o comportamento dos geotêxteis tecidos.

Os tempos de degradação natural no campo, definidos para serem submetidos aos ensaios definidos no programa experimental, foram 90, 180, 270, 360 e 720 dias. Para o ensaio de degradação acelerada no laboratório, os tempos escolhidos para serem submetidos ao ensaio, foram de 8, 16, 24, 32, 40, 80, 200, 400, 800, 1040, 2160 e 4800 horas.

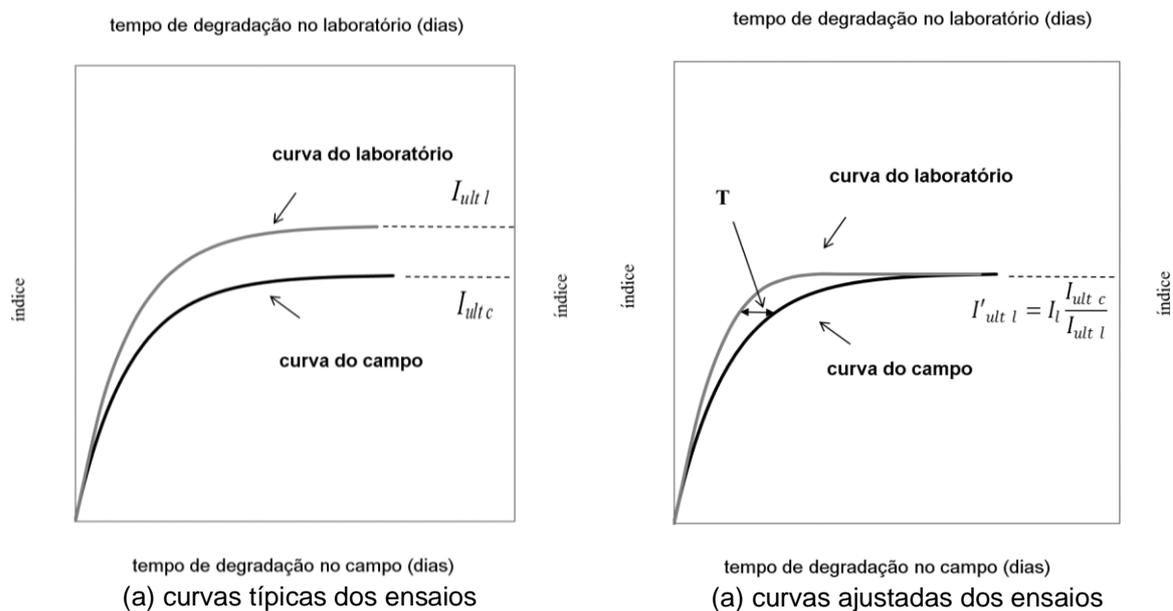
Sabendo o comportamento do material intacto, analisou-se o comportamento do material utilizando o índice proposto por Farjallat (1972), mostrado na Equação 11, onde  $I_0$  é um parâmetro do material intacto, e  $I_d$  é um parâmetro do material degradado. O valor do índice  $I$  pode variar de zero para o material intacto até um valor máximo, que é sempre menor que 1 para os materiais degradados.

$$I = \frac{|I_0 - I_d|}{I_0} \quad [11]$$

### Curva

A partir disso, então, criou-se uma curva relacionando o índice  $I$  de acordo com a propriedade escolhida com seu tempo referente. A Figura 3.26 mostra uma condição genérica para que se possa analisar o comportamento do material pela sua tendência e melhor entender o significado físico das variáveis obtidas representadas na curva.

**Figura 3.26. Relação genérica entre o índice  $I$  do campo e do laboratório com o tempo**



As variáveis  $I_{ult}$  e  $T_0$  correspondem ao parâmetro principal para determinar a curva do comportamento do material;  $I'_{ult l}$  é um ajuste do índice do laboratório  $I_{ult l}$ , enquanto  $F_t$  indica quantas vezes a degradação no campo é maior que a degradação acelerada no laboratório. Então, torna-se possível determinar o tempo de exposição de materiais em degradação no laboratório que representaria o tempo de exposição desejado no projeto. A Equação 12 apresenta este ajuste.

$$I = I_{ult} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) \quad [12]$$

A Equação 19 é representativa tanto para a curva do campo, como para a do laboratório. Em ambos os casos, se comportou exponencialmente.  $I_{ult}$  é um parâmetro adimensional que representa o estado final de degradação do material, em que a variação do índice  $I$  é insignificante com o aumento do tempo de degradação ( $t$ ). Provavelmente, é ligada com uma propriedade intrínseca do material.  $T_0$  é um parâmetro elementar, cuja unidade de medida é o tempo. Eventualmente ligado à durabilidade do material de acordo com o meio ambiente exógeno. Reflete a inclinação inicial da curva de variação do índice de degradação com o tempo. Graficamente, representa o tempo em que a tangente inicial da função  $I_x t$  atinge o valor  $I_{ult}$ . A equação proposta para ajuste dos dados experimentais tem uma fase inicial que é aproximadamente linear (Figura 3.26).

Para determinar a relação entre o tempo e a degradação natural no campo e a degradação acelerada no laboratório, o ajuste inicial do índice de degradação para as amostras de laboratório foi realizado usando a Equação 13.

$$I'_{ult l} = I_l \frac{I_{ult c}}{I_{ult l}} \quad [13]$$

Onde  $I_{ult l}$  denota o índice de degradação ajustado  $I_l$ ,  $I_l$  representa o índice de degradação para as amostras laboratoriais,  $I_{ult l}$  é o índice  $I$  de degradação final para as amostras de laboratório, e  $I_{ult c}$  refere-se ao índice de  $I$  de degradação final para as amostras de campo. E com estes dados pode-se finalizar o modelo (Figura 3.26).

### **Modelo**

A determinação da relação entre os tempos de degradação no campo e no laboratório é denominada  $F_t$ , que relaciona diretamente os resultados do campo com o do laboratório, considerando que apenas a variável  $T_0$  influencia nesta análise. Este coeficiente pode ser obtido através da Equação 14, onde  $T_c$  é o valor da variável  $T_0$  obtido pela curva do campo e  $T_l$  é a variável  $T_0$  obtida pela curva do laboratório.

$$F_t = \frac{T_c}{T_l} \quad [14]$$

Dessa forma, o valor de  $F_t$  é obtido considerando os valores de  $T_0$  indicados nas equações do modelo de acordo com as propriedades estudadas. A partir desse valor, pode-se fazer uma previsão do comportamento do material no campo através da Equação 15, onde  $T_c$  representa o tempo de degradação natural no campo,  $T_l$  o tempo de degradação acelerada no laboratório e  $F_t$  o parâmetro de durabilidade do material.

$$T_c = F_t \times T_l \quad [15]$$

### 3.5 Considerações Finais

Todos os detalhes do programa experimental foram apresentados neste capítulo com detalhes importantes para realização da grande diversidade e quantidade de ensaios que a tese exigiu.

Foi dado o devido destaque ao equipamento de fluência acelerada e à metodologia empregada de forma a contribuir ainda mais com os estudos sobre durabilidade em geossintéticos.

Finalizando o capítulo, foram apresentados os parâmetros do ensaio de caracterização da durabilidade com a determinação e explicação do índice, o desenvolvimento das curvas de variação dos índices com o tempo e, por fim, o modelo que permite análises de durabilidade.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentados os geossintéticos estudados e os resultados de caracterização básica dos geossintéticos utilizados como FTT e outras análises dos ensaios punção estático confinado e fluência não confinada de amostras intactas. O mesmo procedimento foi realizado em amostras degradadas naturalmente no campo e de forma acelerada no laboratório com ensaios de condensação e radiação ultravioleta. A fluência acelerada foi realizada por procedimento de saturação e secagem. Realizaram-se análises por microscopia ótica nos quatro tipos de geotêxteis tecido utilizados na pesquisa, denominados PP500, PET340, PET740 e PP925, bem como ensaios de espectrofotometria por infravermelho e ultravioleta, seja em amostras intactas, seja em amostras degradadas no campo ou laboratório.

### 4.2 Ensaios de Caracterização

#### *Propriedades Físicas*

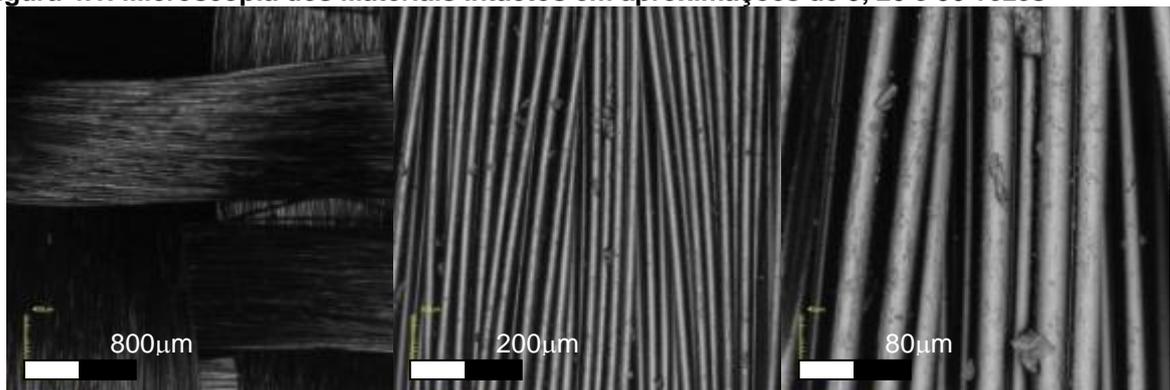
As primeiras análises dos ensaios de caracterização dos geossintéticos foram realizadas para determinar suas propriedades físicas. Os ensaios utilizados foram de gramatura ( $\mu_A$ ), espessura ( $t_{GTX}$ ) e porosidade ( $n_{GTX}$ ) nos geotêxteis tecidos e apresentados na Tabela 4.1.

Outros ensaios que ajudaram na caracterização dos geotêxteis e que estão nesta pesquisa são as análises por microscopia ótica e espectrofotometria por UV-Vis e FTIR. Com a primeira, observa-se melhor qualitativamente a estrutura física das amostras (Figura 4.1) e, com a segunda, determinam-se quantitativamente aspectos de absorvância e transmitância (Figura 4.2 a Figura 4.7).

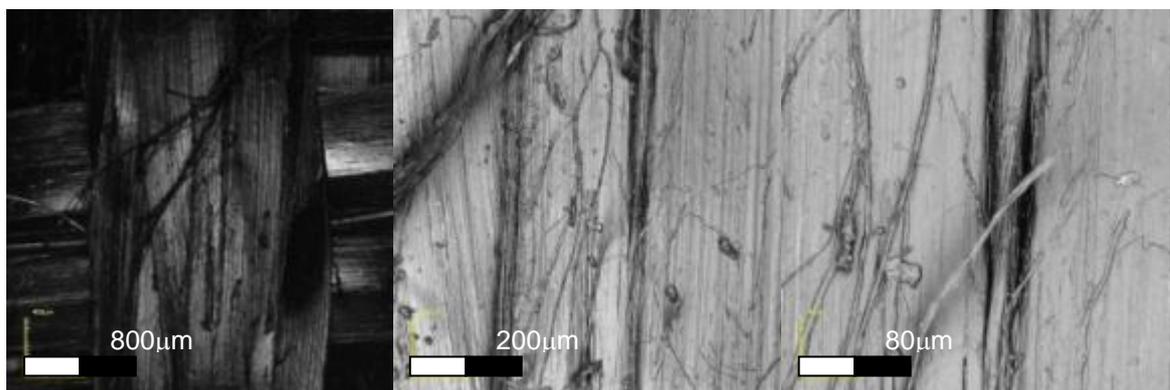
**Tabela 4.1: Ensaios de caracterização física**

Propriedade	Material			
	PET340	PP500	PET740	PP925
$\mu_A$ (g/m <sup>2</sup> )	340 ± 8	500 ± 9	740 ± 23	925 ± 25
$t_{GTX}$ (mm)	0,51 ± 0,02	1,53 ± 0,04	1,17 ± 0,01	2,62 ± 0,06
$n_{GTX}$ (%)	49 ± 1	62 ± 1	51 ± 1	58 ± 1

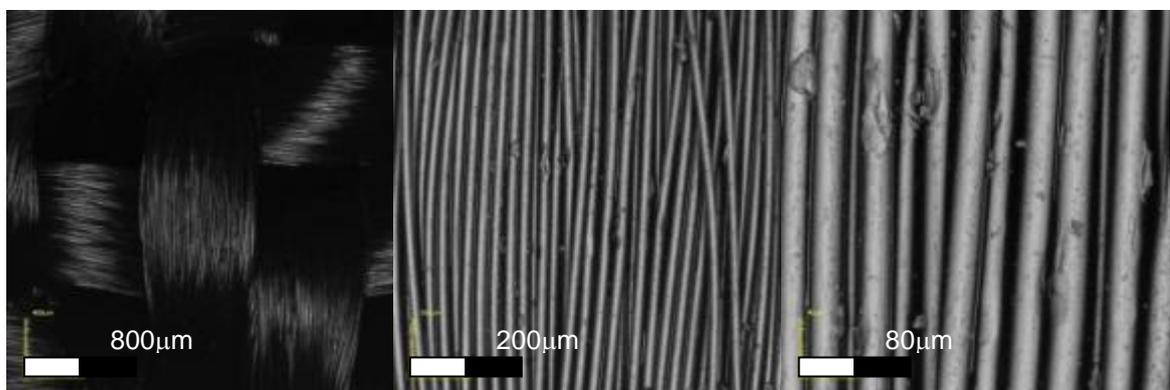
Figura 4.1. Microscopia dos Materiais Intactos em aproximações de 5, 20 e 50 vezes



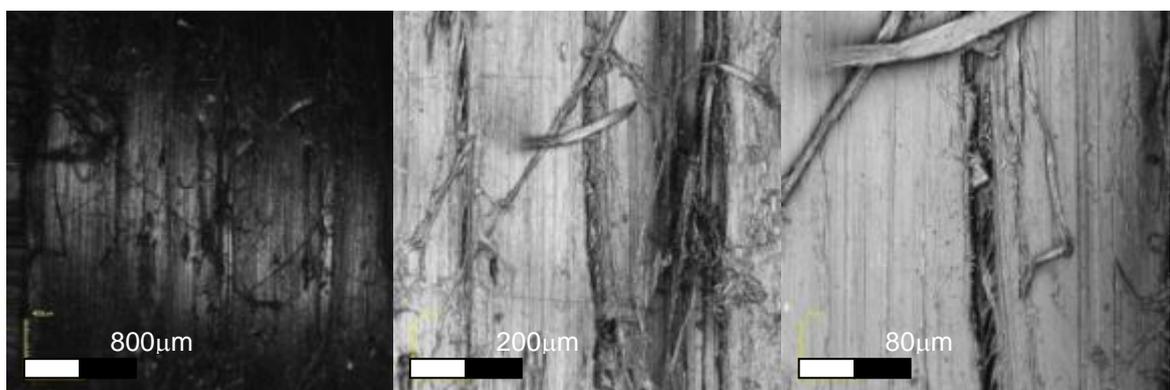
(a) PET340



(b) PP500



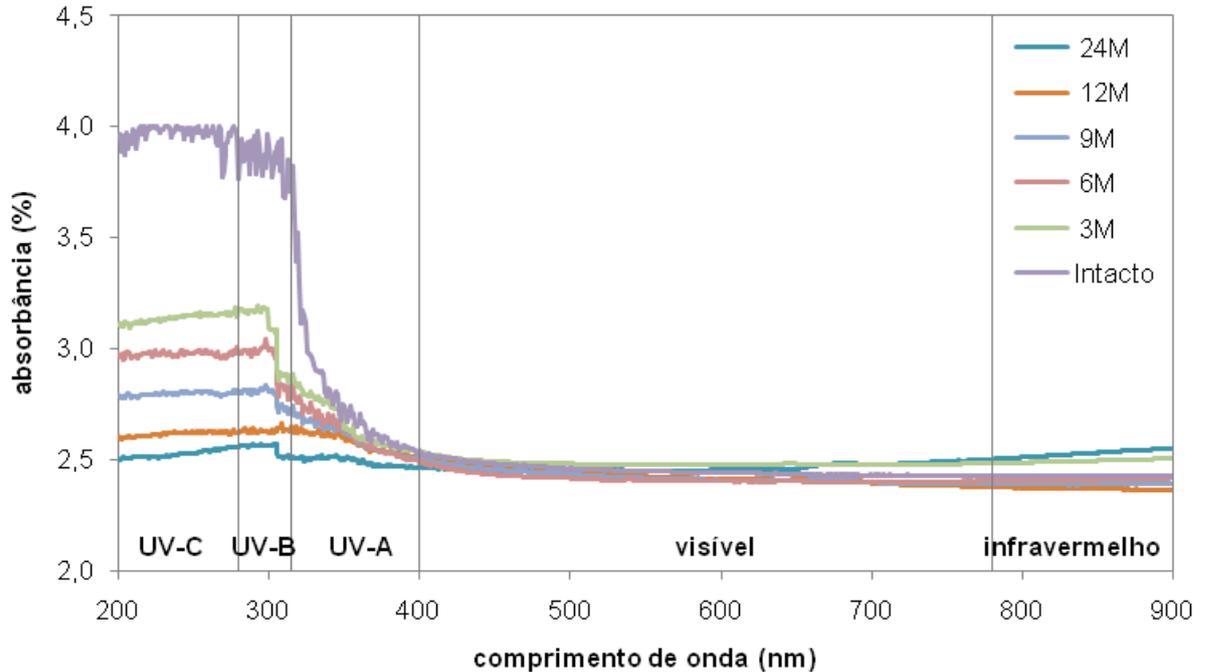
(c) PET740



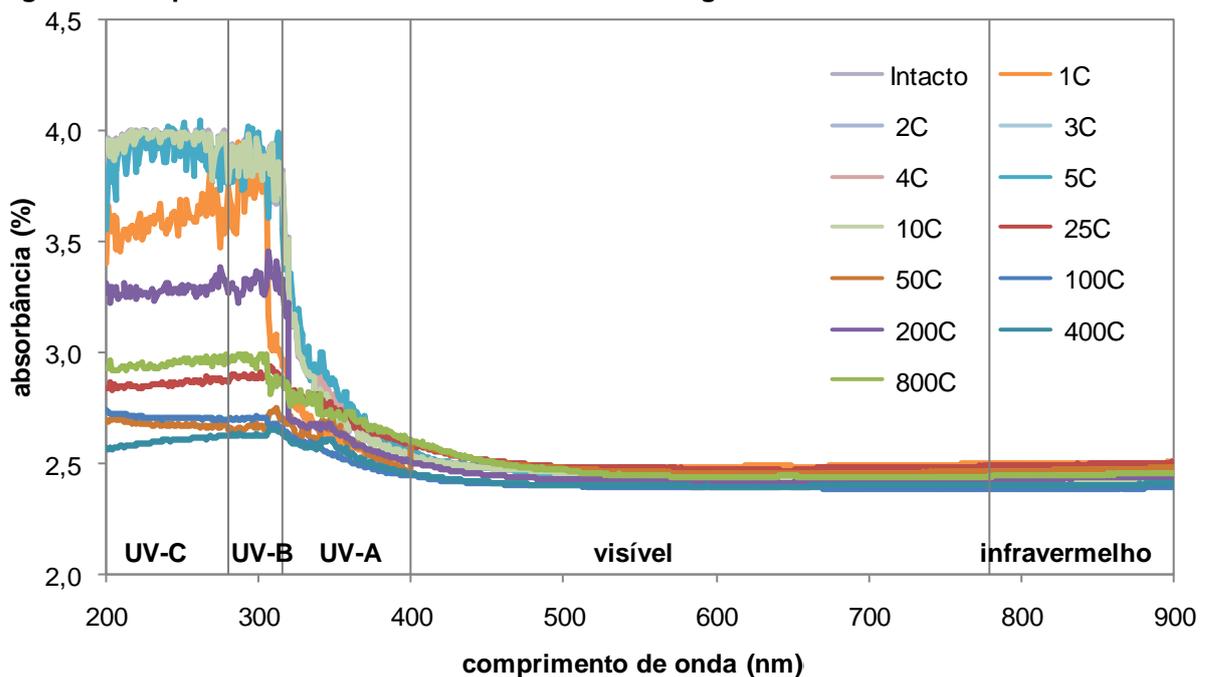
(d) PP925

Na Figura 4.1 observa-se os laminetes de polipropilenos do PP500 e PP925 com aproximações onde se verificam-se fibras desprendidas. Já os poliésteres PET340 e PET740 de multifilamentos apresentam pequenas extrusões. A espectrofotometria de UV-Vis das Figura 4.2 e Figura 4.3 possuem os resultados das amostras PET340, o geotêxtil de menor espessura utilizado na pesquisa. Estas características permitem melhor avaliação da absorbância dos materiais degradados.

**Figura 4.2. Espectrofotometria de UV-Vis do PET340 degradado no campo**



**Figura 4.3. Espectrofotometria de UV-Vis do PET340 degradado no laboratório**



As Figura 4.4 e Figura 4.5 apresentam o PET740 com resultados que permitem avaliação da absorbância. As espectrofotometrias de UV-Vis mostraram que amostras mais espessas podem diminuir a qualidade da resposta do ensaio, quando os materiais não se encontram triturados ou na forma líquida. Materiais degradados no laboratório absorveram raios ultravioletas tanto quanto a amostra intacta. Foi observada, também, absorbância no espectro visível.

Figura 4.4. Espectrofotometria de UV-Vis do PET740 degradado no campo

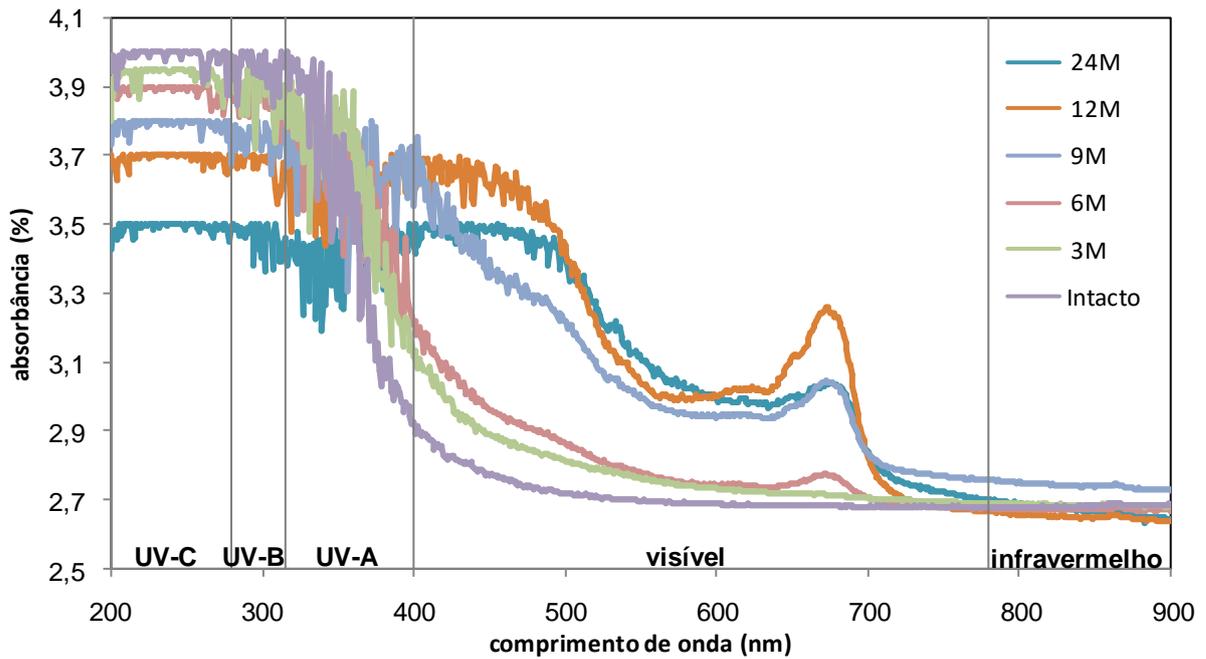
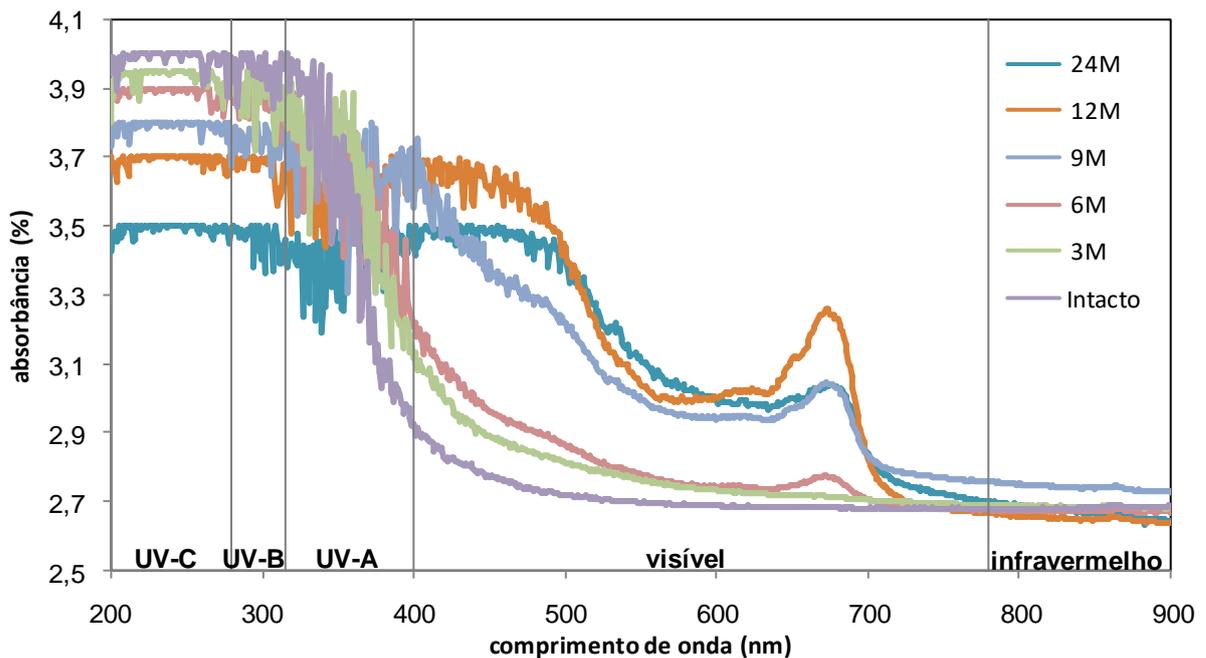
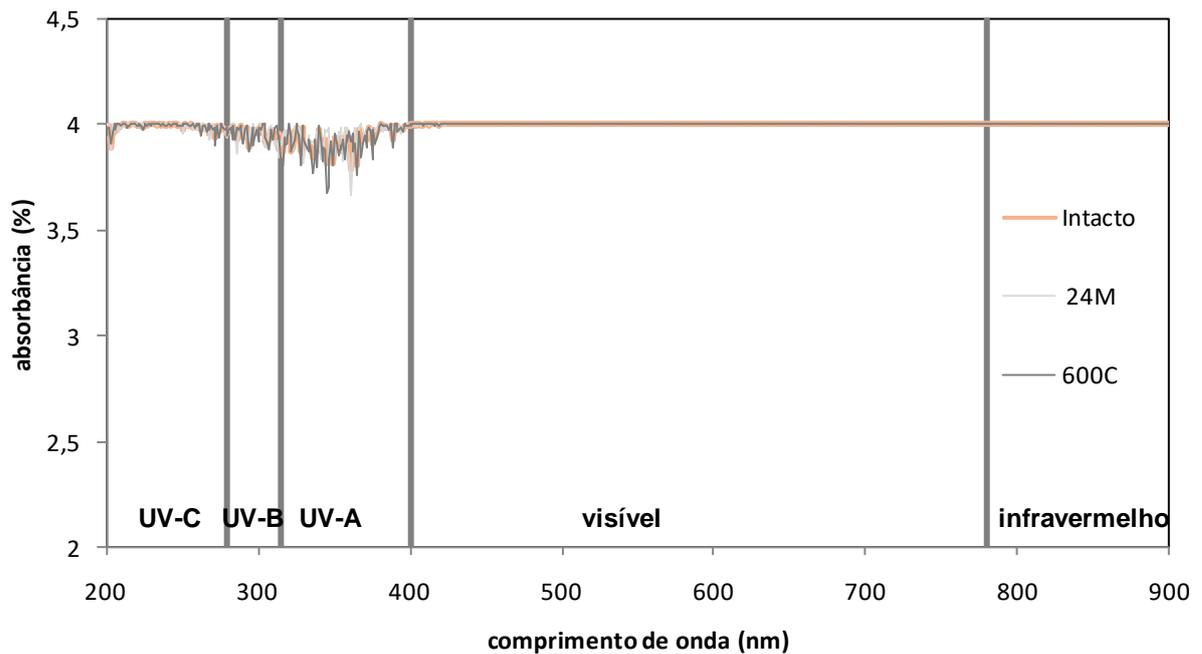


Figura 4.5. Espectrofotometria de UV-Vis do PET740 degradado no laboratório

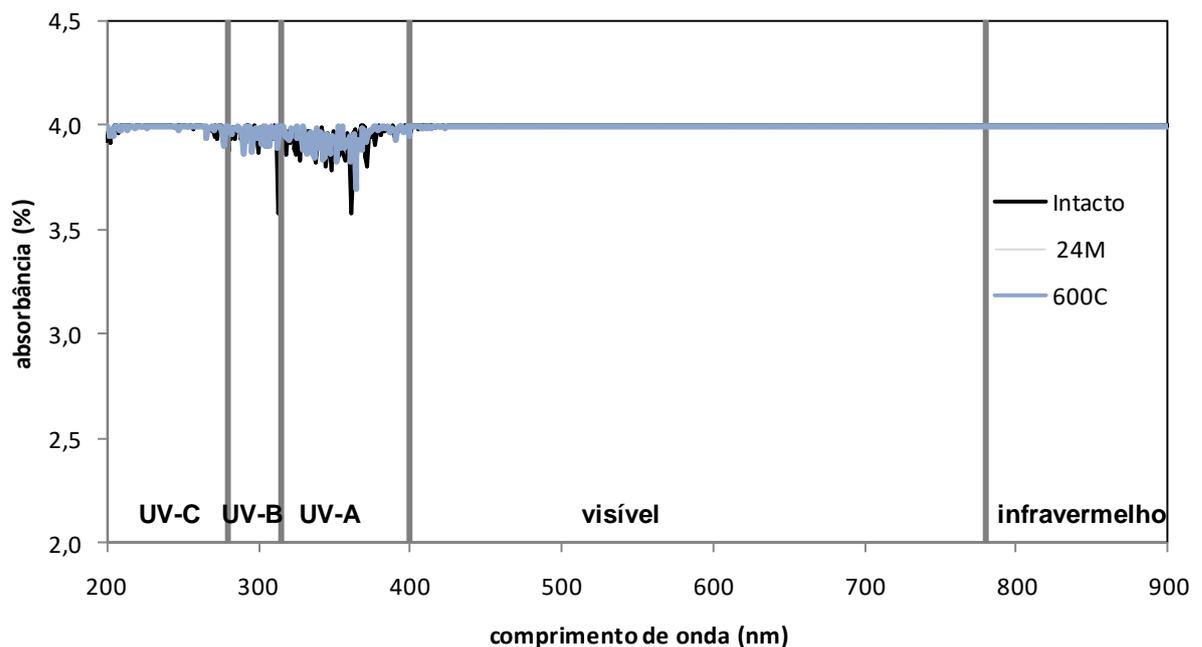


A espectrofotometria de UV-Vis das Figura 4.6 e Figura 4.7 mostram os materiais que foram analisados com resultados que não permitiram boa avaliação da absorbância. As amostras de geotêxteis tecidos PP500 e PP925 podem conter algum tipo de aditivo químico, como por exemplo, estabilizantes UV ou antioxidantes, uma possível justificativa por apresentaram variações de absorvências significativas entre o material intacto e degradado.

**Figura 4.6. Espectrofotometria de UV-Vis do PP500 degradado e intacto**

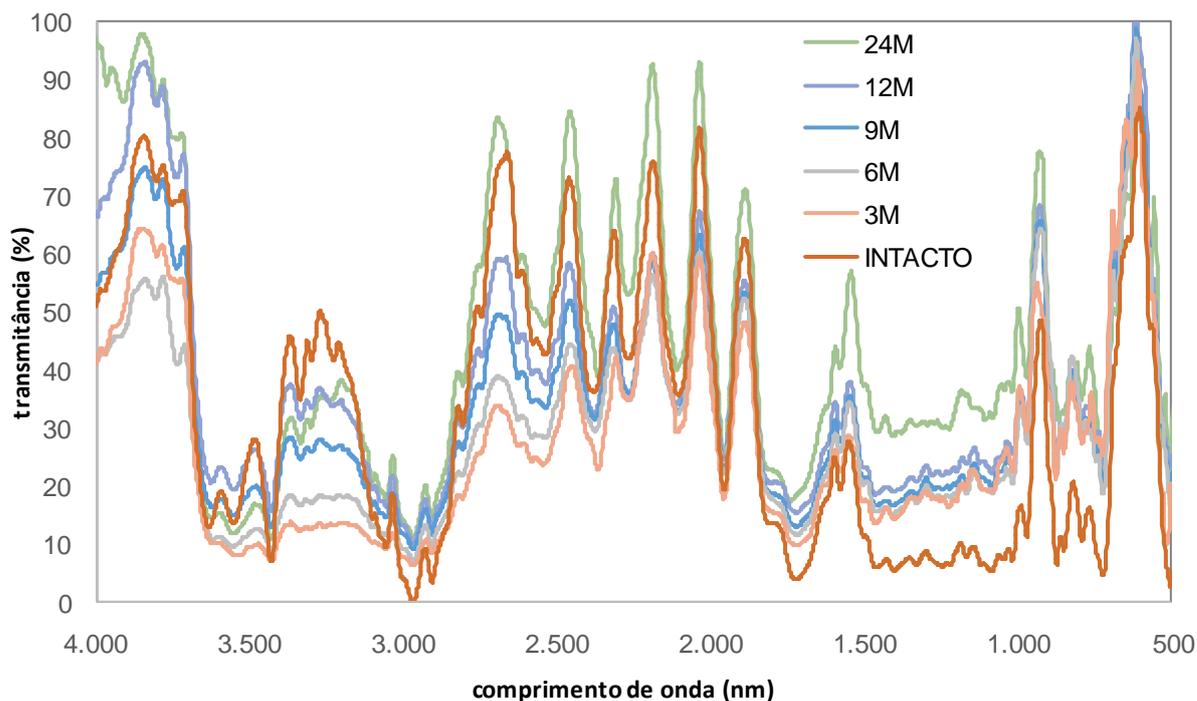


**Figura 4.7. Espectrofotometria de UV-Vis do PP925 degradado e intacto**

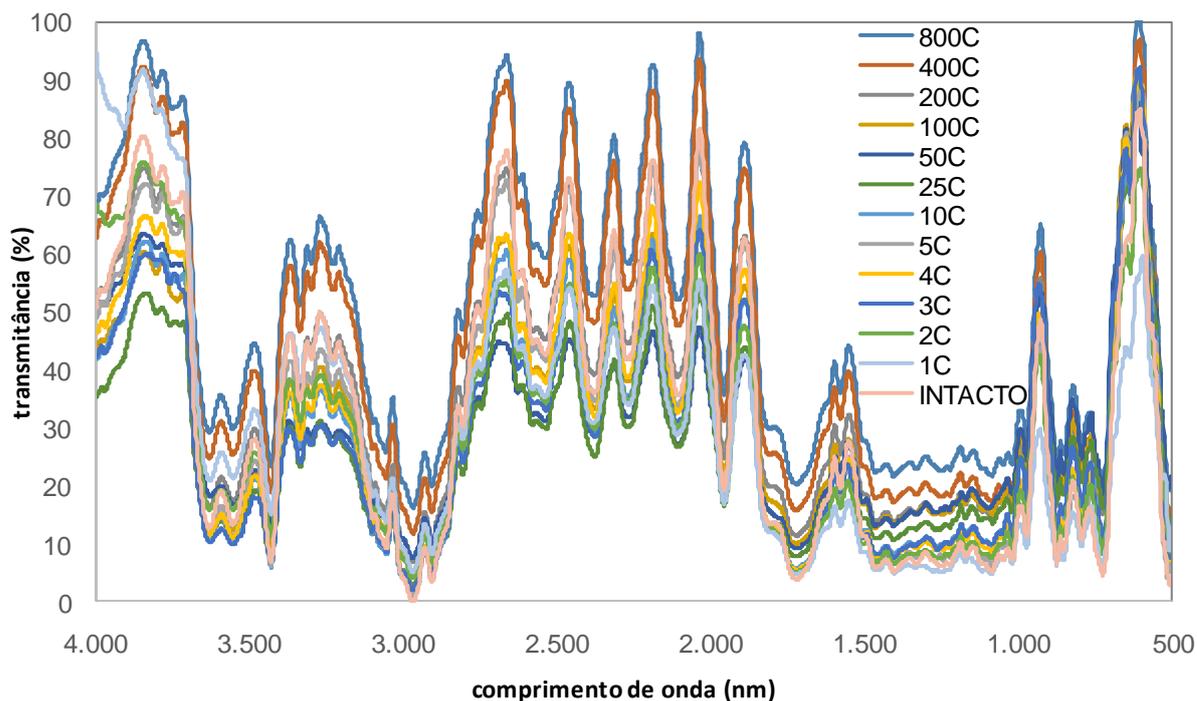


A espectrofotometria de FTIR não permitiu análise das amostras PET740 e PP925, devido à espessura comprometer a análise com elevada variabilidade dos resultados ou ao impedimento da leitura da transmitância pelo equipamento. As Figuras Figura 4.8 e Figura 4.9 exibem a amostra PET340. As leituras mostram que a degradação promove mudanças nas estruturas física e química do material.

**Figura 4.8. Espectrofotometria de FTIR do PET340 degradado no campo**

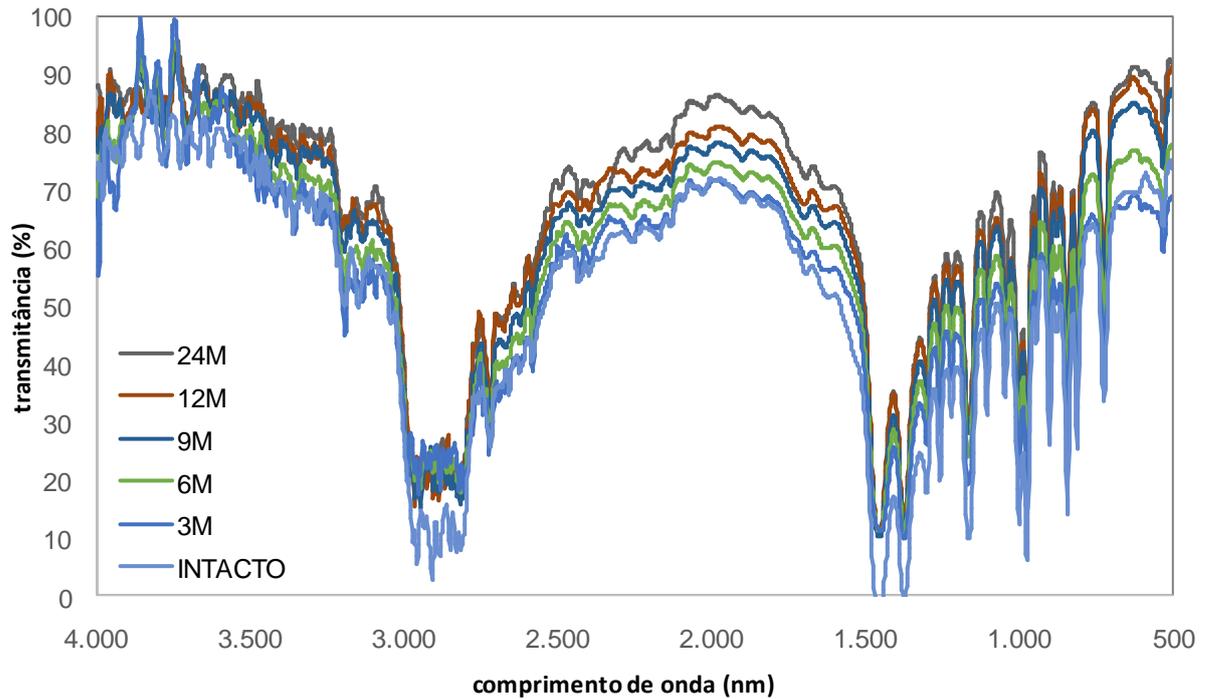


**Figura 4.9. Espectrofotometria de FTIR do PET340 degradado no laboratório**

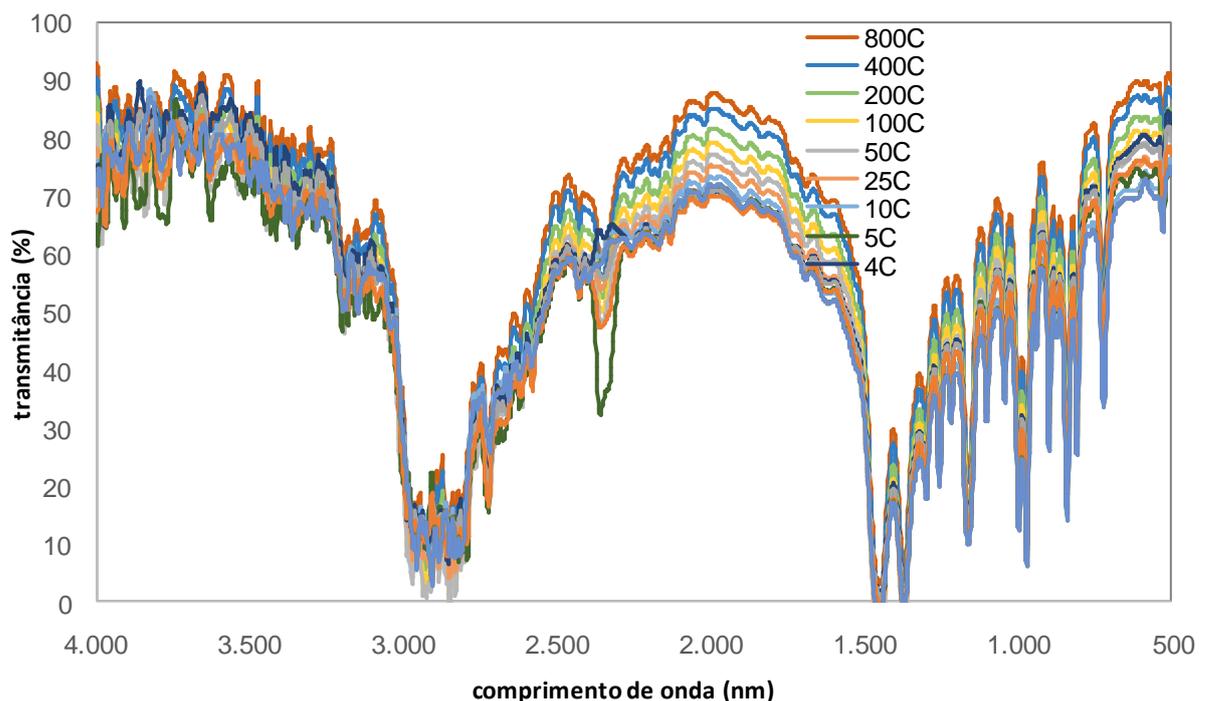


As Figuras Figura 4.10 e Figura 4.11 apresentam a amostra PP500 da mesma maneira que as leituras da amostra PET340. Observa-se que a degradação promove mudanças na estrutura física e química do material. Outro aspecto é que, em alguns comprimentos de onda, há uma variação entre a resposta das amostras degradadas naturalmente no campo e as amostras degradadas aceleradamente em laboratório.

**Figura 4.10. Espectrofotometria de FTIR do PP500 degradado no campo**



**Figura 4.11. Espectrofotometria de FTIR do PP500 degradado no laboratório**

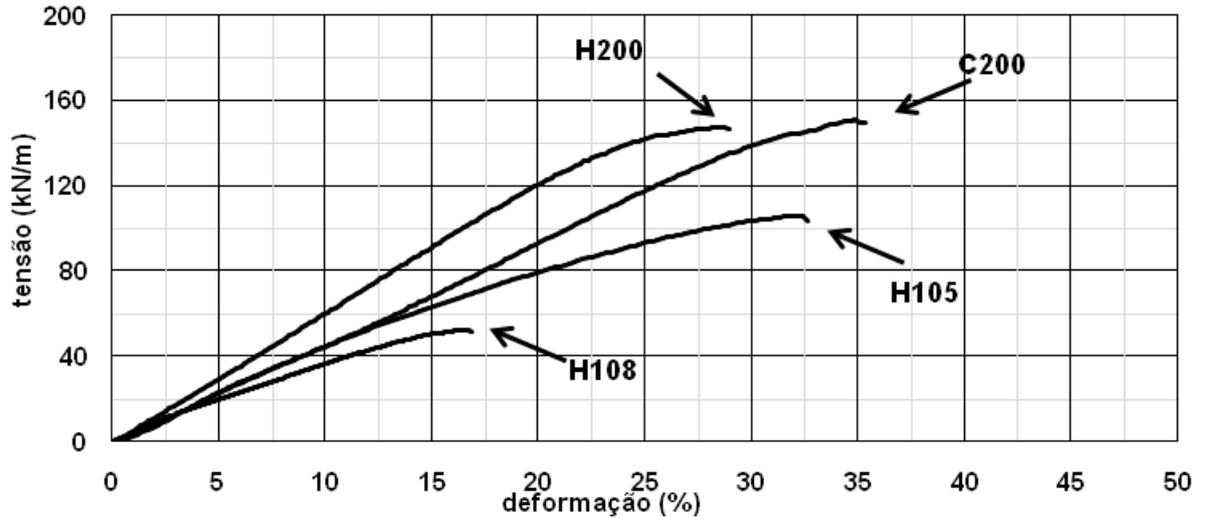


## Propriedades Mecânicas

### Tração

A Figura 4.12 apresenta o ensaio mais utilizado em geossintéticos. As respostas são diferentes, em termos de tensão e deformação, independentemente do polímero base dos geotêxteis tecidos.

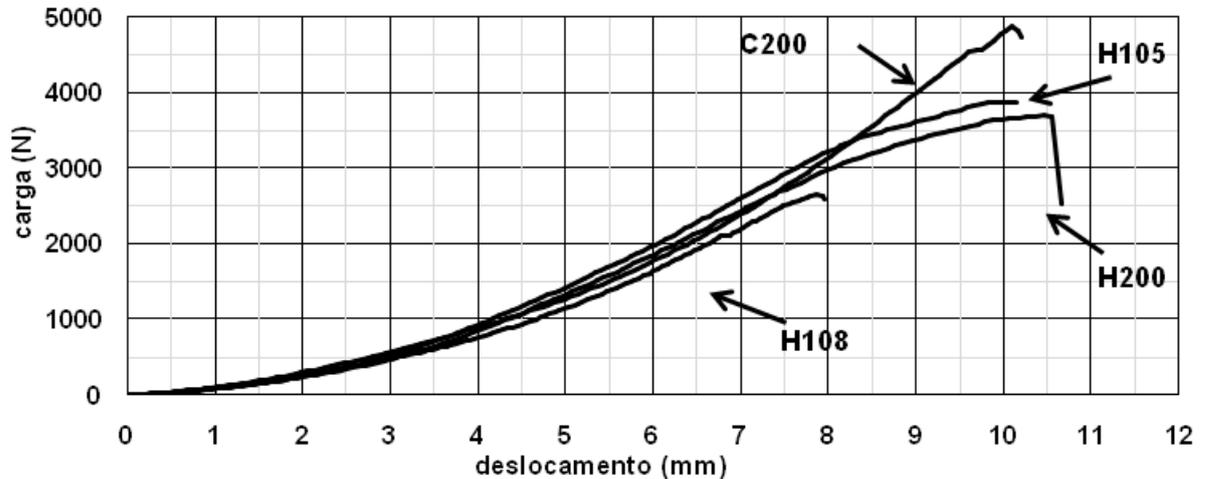
Figura 4.12. Média dos ensaios de tração direta



### Puncionamento

A Figura 4.13 apresenta os dados da perfuração nos geotêxteis.

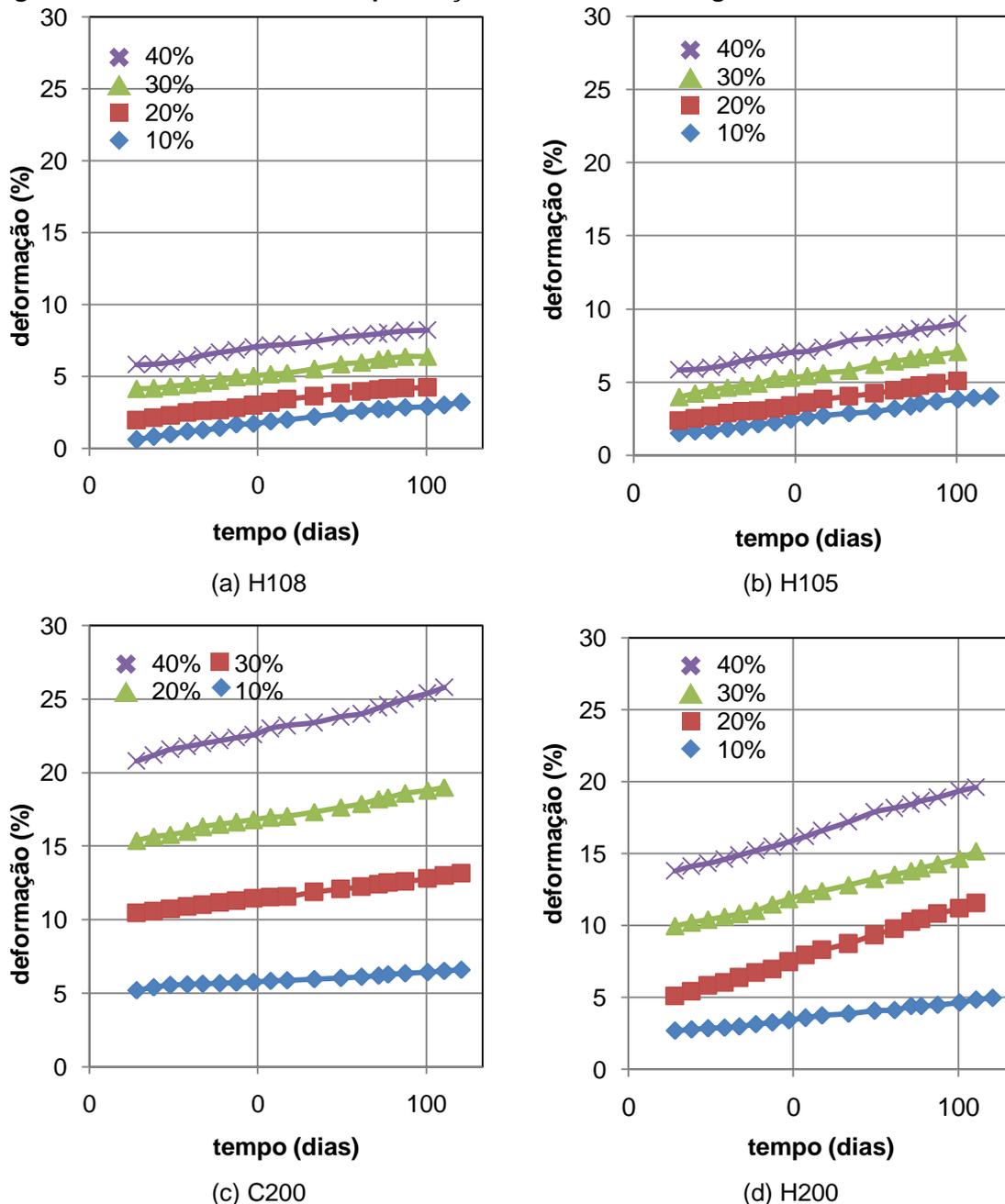
Figura 4.13. Média dos ensaios de puncionamento



## Fluência

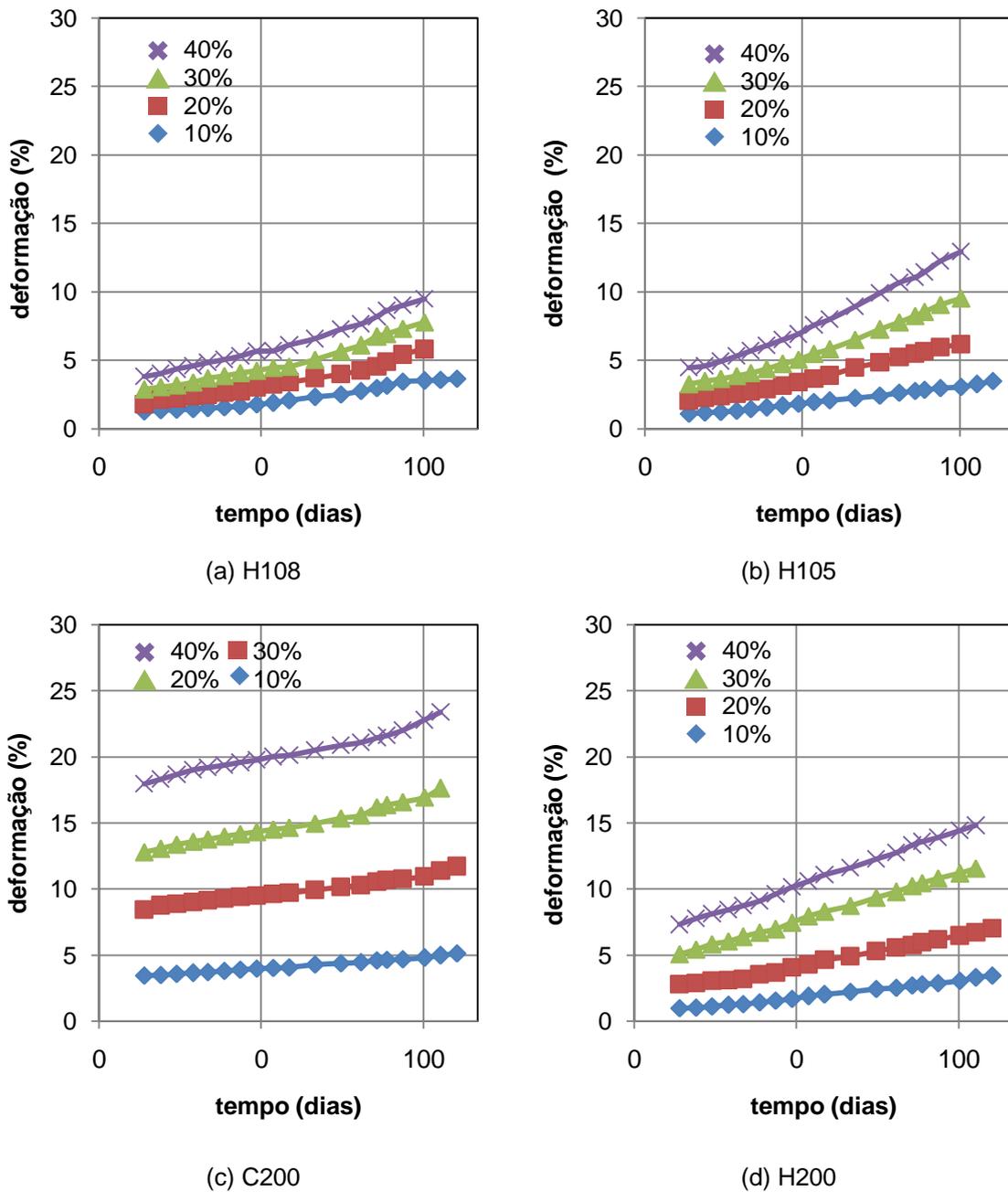
As Figura 4.14 e Figura 4.15 exibem os dados de fluência. Os primeiros resultados mostram as análises por meio das garras de tração, ou seja, o ensaio tradicional. A forma do gráfico mostra linearidade no comportamento da deformação com o tempo e deixa forte evidencia do comportamento de fluência secundária nos quatro níveis de carga. Em cada material, observa-se, também, o aumento da deformação, justificado pelo ensaio de tração direta.

Figura 4.14. Ensaio de fluência por tração em 4 níveis de carga



A Figura 4.15 exibe os resultados das análises por meio das garras de puncionamento. A forma do gráfico ficou similar ao ensaio tradicional. A forma de cálculo apresentada na metodologia e os níveis de tensão serão mais detalhados no próximo Capítulo. Em cada material, observou-se, também, o aumento da deformação, linearidade da fluência secundária e uma angulação maior das curvas para cada nível de tensão. As deformações crescem em uma taxa um pouco maior que no ensaio tradicional de fluência.

Figura 4.15. Ensaios de fluência por puncionamento em 4 níveis de carga



## Propriedades Hidráulicas

### Permissividade

A Tabela 4.2 fornece dados relativos ao ensaio de permeabilidade. Com a relação entre esta propriedade e a espessura do geotêxtil tecido determina-se a permissividade do material.

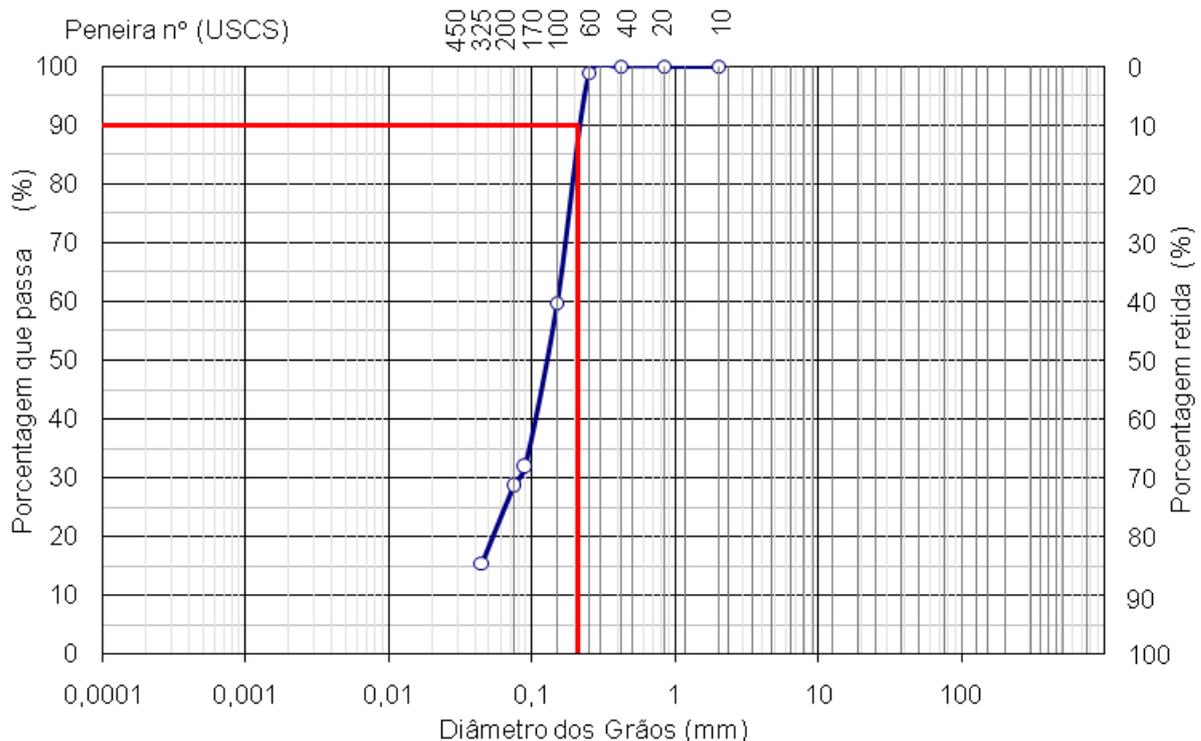
**Tabela 4.2: Dados de permissividade e permeabilidade dos geotêxteis**

Propriedade	Material			
	H108	H105	C200	H200
$k_n$ (m/s)	0,021 ± 0,001	0,008 ± 0,000	0,003 ± 0,001	0,007 ± 0,002
$\psi$ (s <sup>-1</sup> )	0,042 ± 0,002	0,005 ± 0,000	0,002 ± 0,001	0,003 ± 0,001

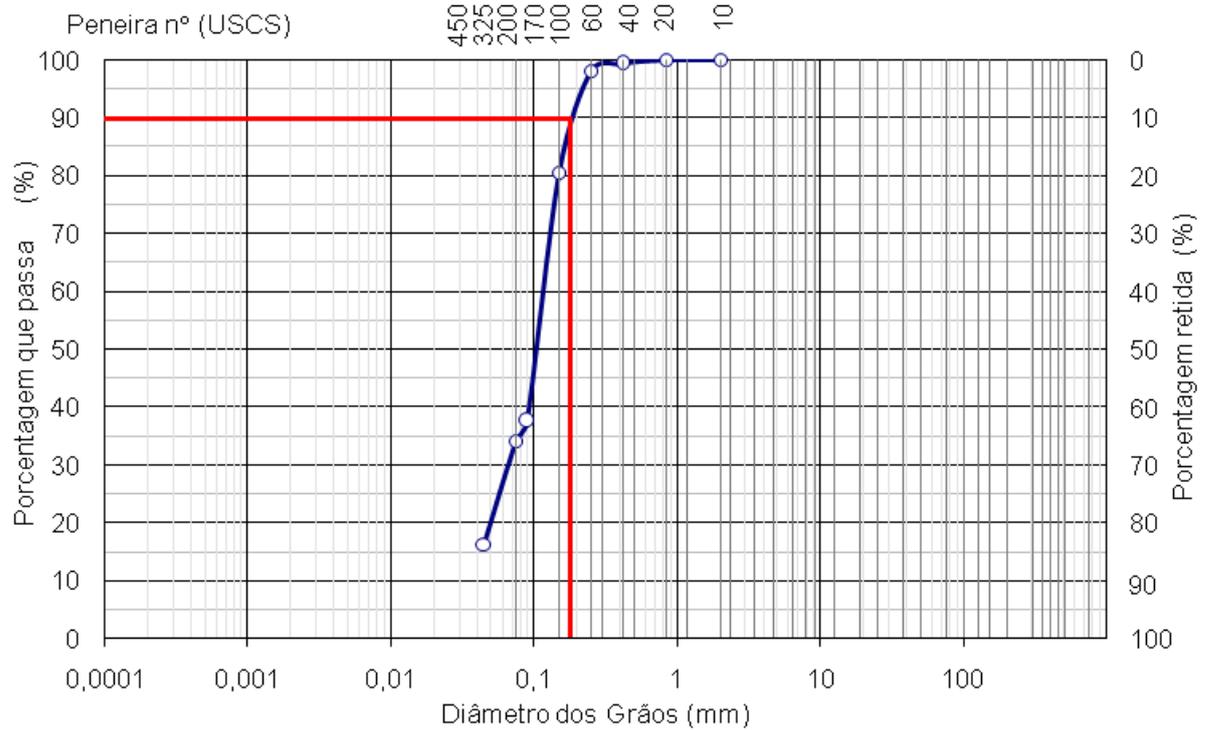
### Abertura de Filtração

Esta propriedade, denominada  $O_{90}$ , equivale a 90% do solo graduado passante pelos geotêxteis durante o ensaio. A abertura de filtração é obtida graficamente pelo resultado do ensaio de granulometria (Figura 4.16 a Figura 4.19). A Tabela 4.3 resume os valores encontrados na Figuras apresentadas.

**Figura 4.16. Abertura de filtração do geotêxtil PET340**

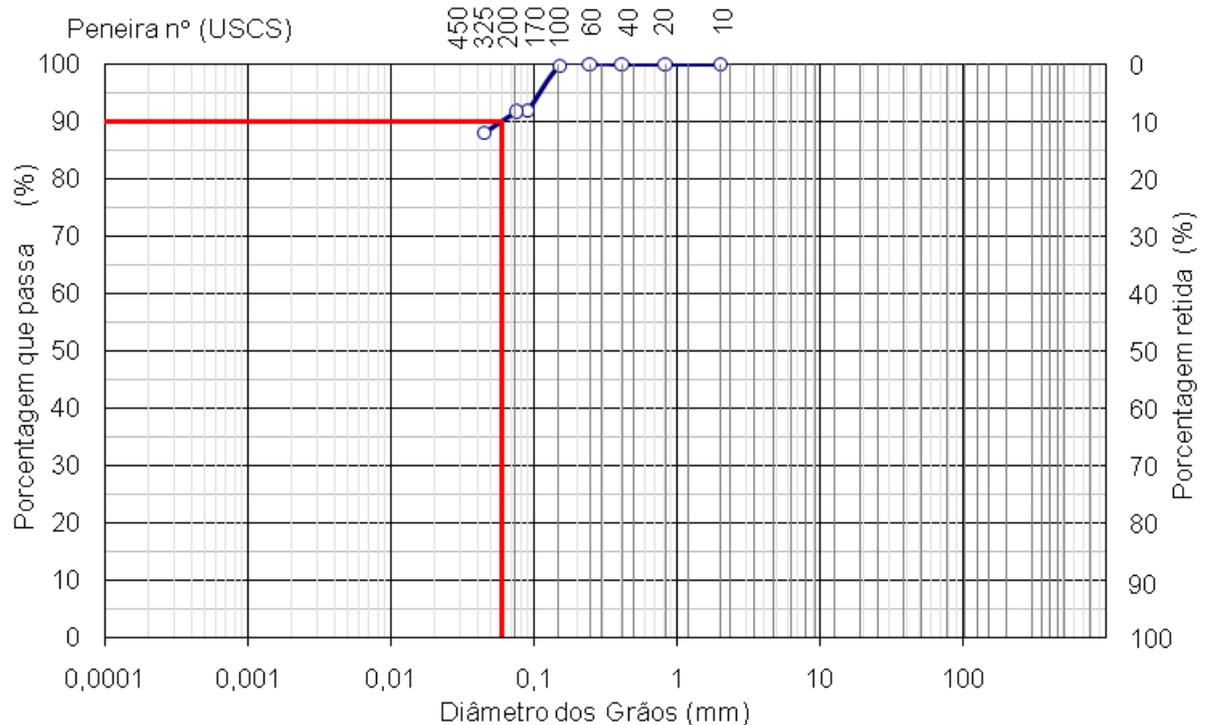


**Figura 4.17. Abertura de filtração do geotêxtil PP500**

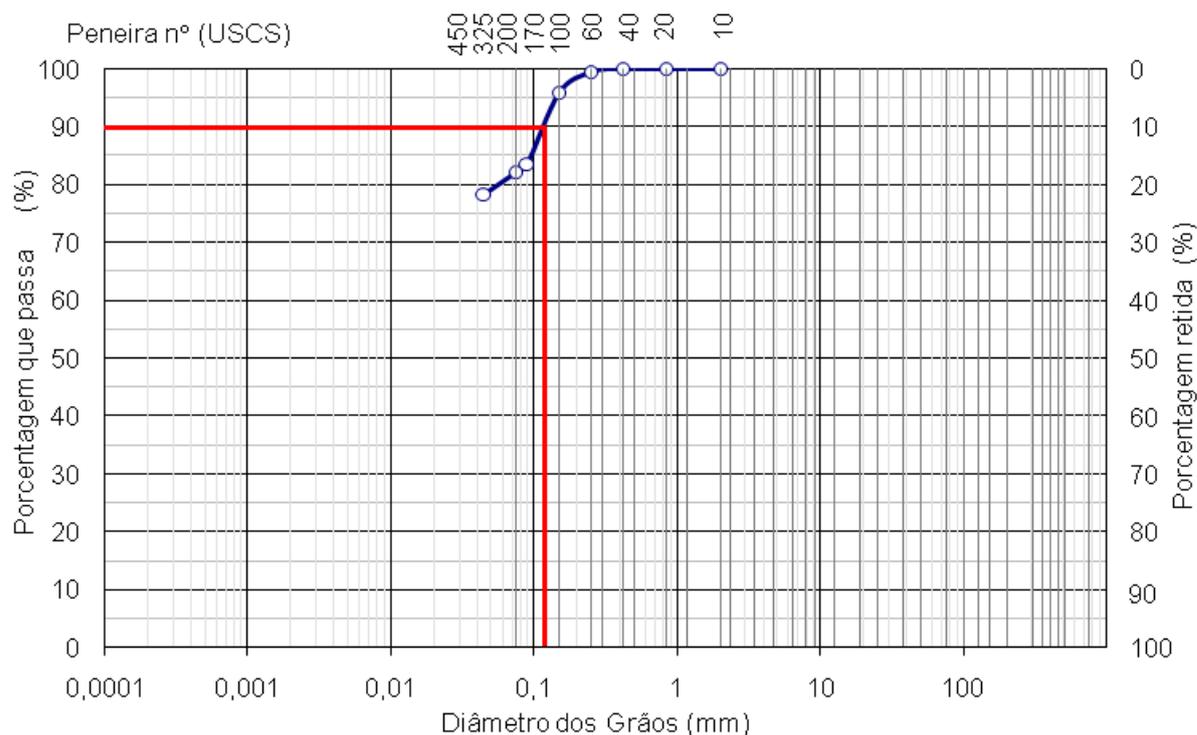


As propriedades físicas interferem diretamente nestes resultados. Em relação à espessura, gramatura e porosidade, a abertura de filtração responde de maneira inversamente proporcional a estes dados.

**Figura 4.18. Abertura de filtração do geotêxtil PET740**



**Figura 4.19. Abertura de filtração do geotêxtil PP925**



**Tabela 4.3: Resultados de abertura de filtração dos geotêxteis**

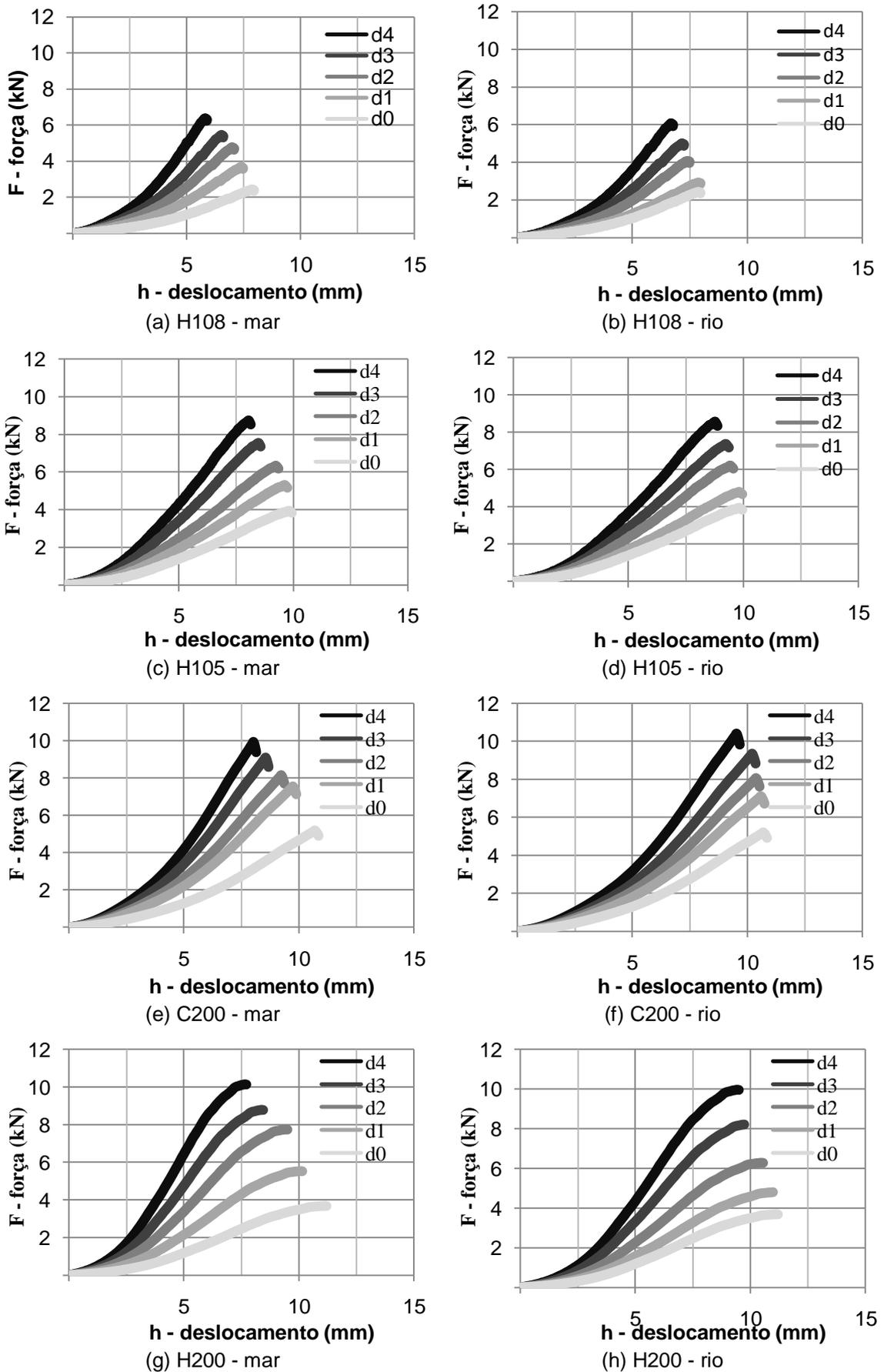
Propriedade	Material			
	H108	H105	C200	H200
$O_{90}$ (mm)	$0,21 \pm 0,021$	$0,18 \pm 0,006$	$0,06 \pm 0,012$	$0,12 \pm 0,017$

### ***Propriedades de Desempenho***

#### ***Punção Confinada***

Sabendo que os geossintéticos normalmente, na prática, se encontram confinados, os resultados de laboratório da resistência ao puncionamento são inferiores aos observados no campo. Sendo assim, os resultados dos ensaios de puncionamento não apresentam o real comportamento desta ocorrência no campo. Realizar ensaios de puncionamento confinado é uma possibilidade para analisar o que realmente acontece com material sujeito à perfuração no campo. A Figura 4.20 apresenta os resultados dos ensaios. Pode-se observar que os solos geram maior resistência quanto à perfuração e restringem as deformações dos geotêxteis conforme o aumento da densidade dos solos.

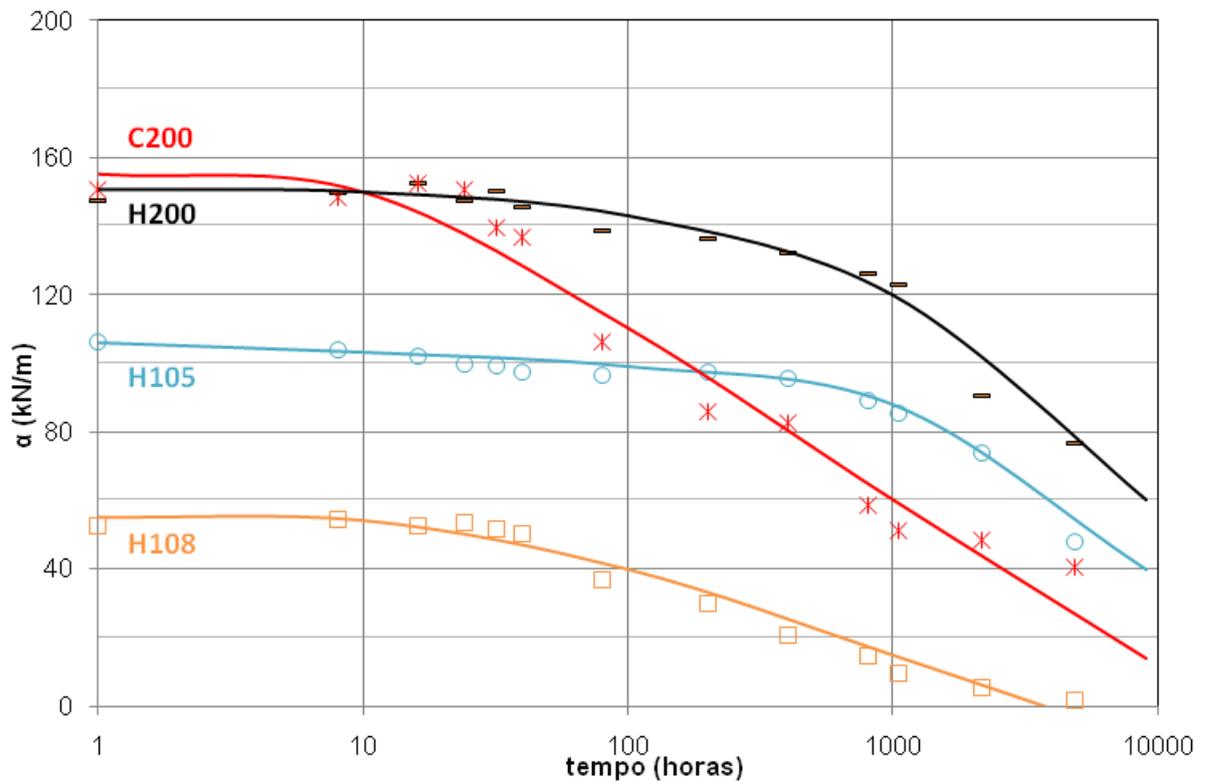
Figura 4.20. Ensaio de puncionamento confinado



## Radiação Ultravioleta

A duração dos tempos de exposição foi próxima às normatizadas de 400, 800, 1200, 1600 e 2000 horas de UV, a fim de se estabelecerem tendências de comportamento (Figura 4.21). O tempo de exposição total seguiu orientação da norma anterior à vigente, por isso, os tempos revelaram valores maiores aos estabelecidos pela norma atual, já que o tempo de condensação foi maior.

Figura 4.21. Resistência à tração com o tempo de exposição à degradação ultravioleta



## Propriedades de Durabilidade

### Degradação no Campo

Este estudo compreendeu o levantamento de dados meteorológicos durante o período de degradação natural no campo. Tais dados foram obtidos diretamente pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2016). A Figura 4.22 indica os valores climáticos de radiação solar acumulada diária e a temperatura média diária durante o período de 2 anos. Na Figura 4.23, têm-se outras condições climáticas, como umidade relativa do ar média diária e precipitação acumulada diária.

Figura 4.22. Radiação solar acumulada diária (MJ/m<sup>2</sup>) e temperatura média diária (°C)

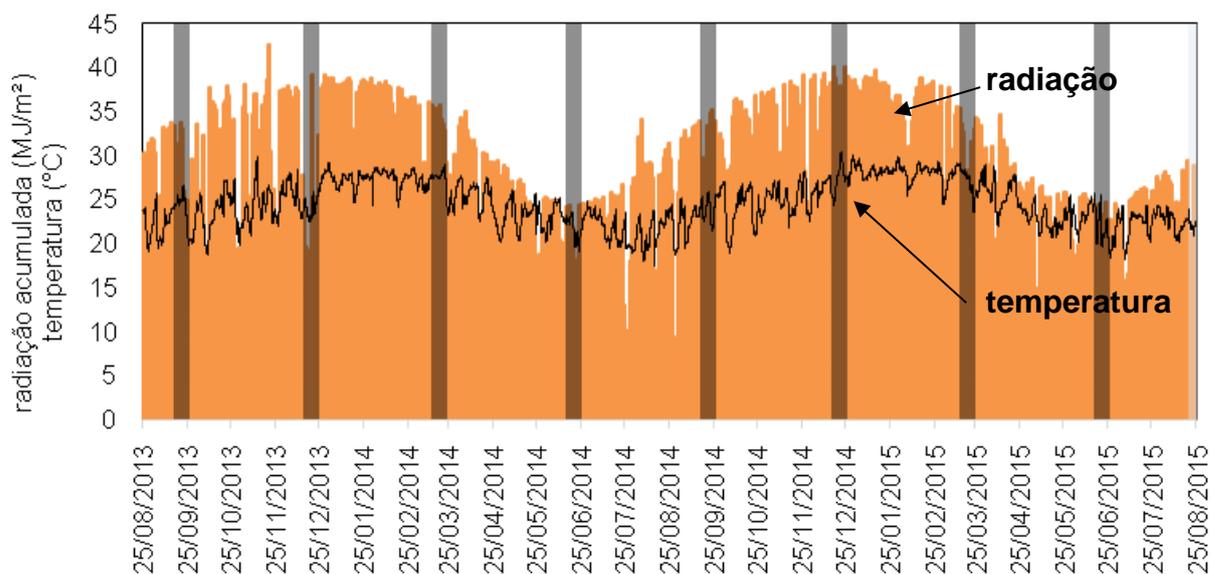
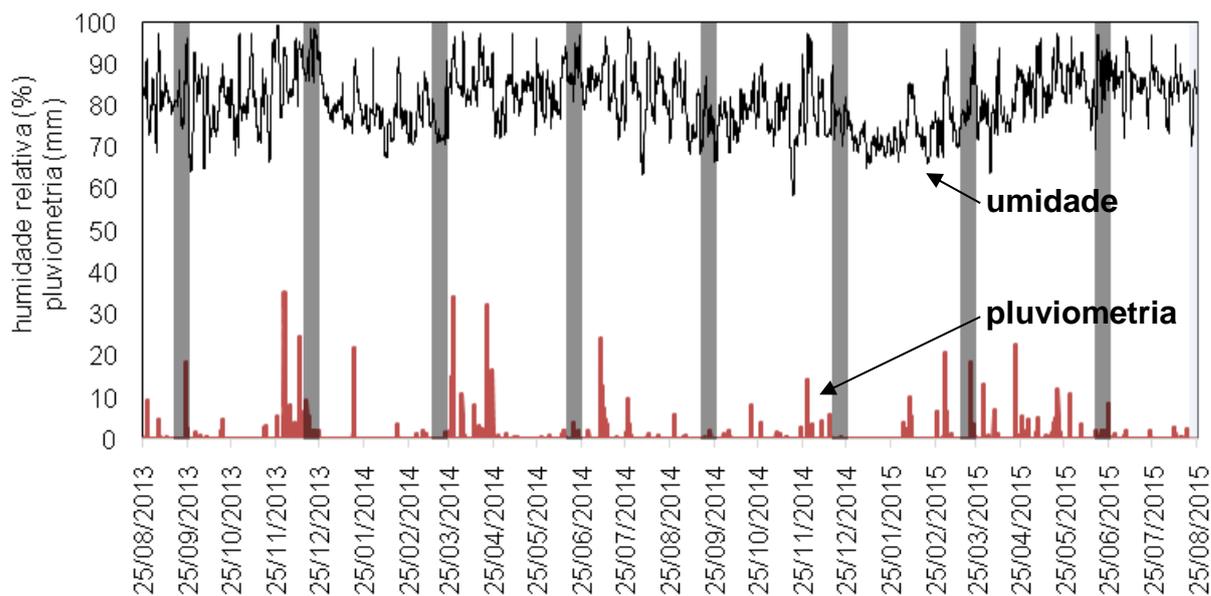


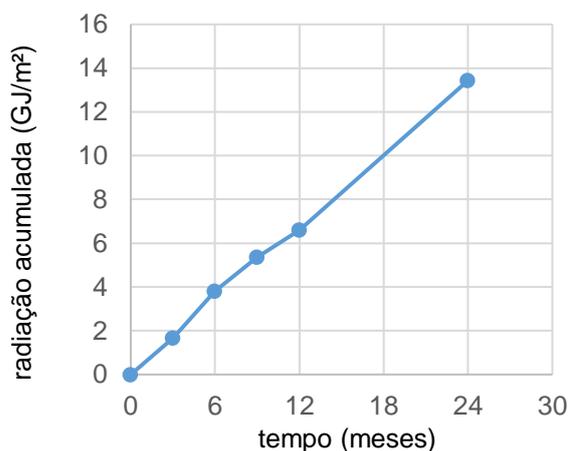
Figura 4.23. Precipitação acumulada diária (mm) e umidade relativa do ar média diária (%)



Como pode ser verificado na Figura 4.24, houve incidência de radiação solar com picos auge na primavera e verão. O valor total acumulado foi de 134,36GJ/m<sup>2</sup> (Figura 4.24a) associado à temperatura média diária de 23,4°C. Em termos de incidência de radiação ultravioleta, tem-se 10,07GJ/m<sup>2</sup>, ou seja, um valor correspondente a 7,5% da incidência total acumulada da radiação solar conforme estabelece a norma ISO TS 13434 (2008). A Figura 4.24b ilustra retirada do material, no campos experimental, em dia típico de sol.

A umidade relativa do ar manteve-se em 85% de média e houve pouca precipitação durante os dias de realização do estudo, isto é, alguns dias isolados apresentando precipitação, como pode ser ilustrado com a Figura 4.24c. O índice pluviométrico total deste período foi de 1487,8mm (Figura 4.24d).

**Figura 4.24. Dados e imagens relativas à degradação no campo**



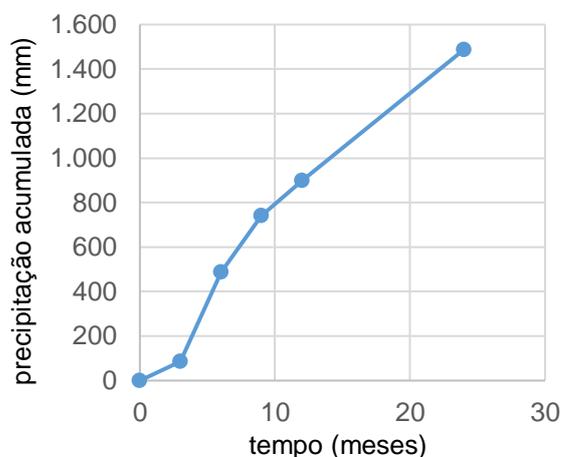
(a) dados de radiação



(b) amostragem do dia 25/02/2014 com sol



(c) amostragem do dia 25/11/2013 com chuva

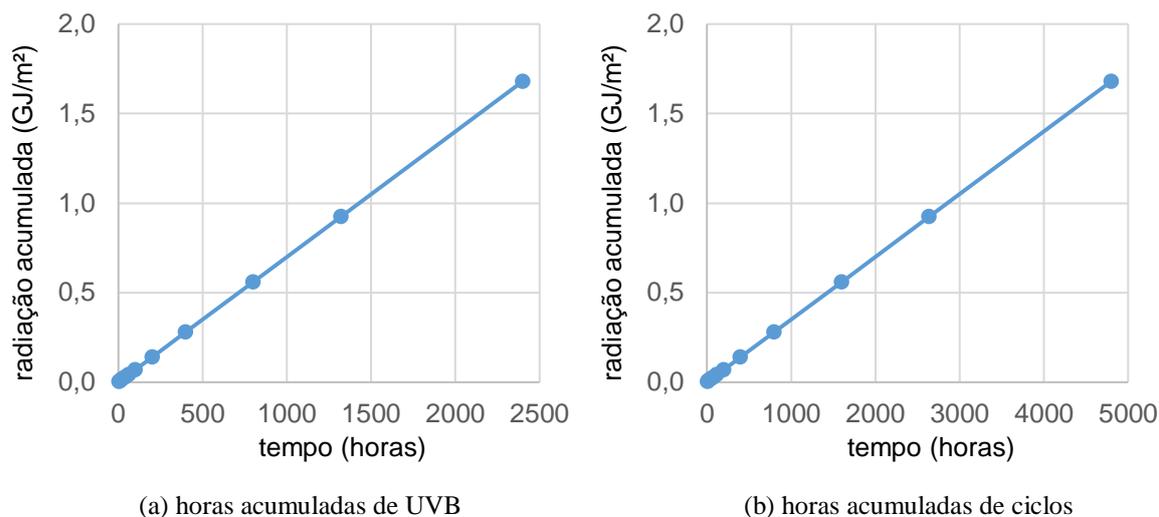


(d) dados de precipitação

### *Degradação no Laboratório*

Os procedimentos utilizados nesta pesquisa foram a exposição à radiação ultravioleta e a ciclagem por saturação e secagem. A radiação por UVB, durante os tempos de exposição, foi caracterizada pela Figura 4.25. Já as temperaturas e o tempo de ciclagem foram apresentados na metodologia como procedimento com caracterização baseada em resultados de artigos citados.

**Figura 4.25. Dados de radiação acumulada durante exposição em laboratório**



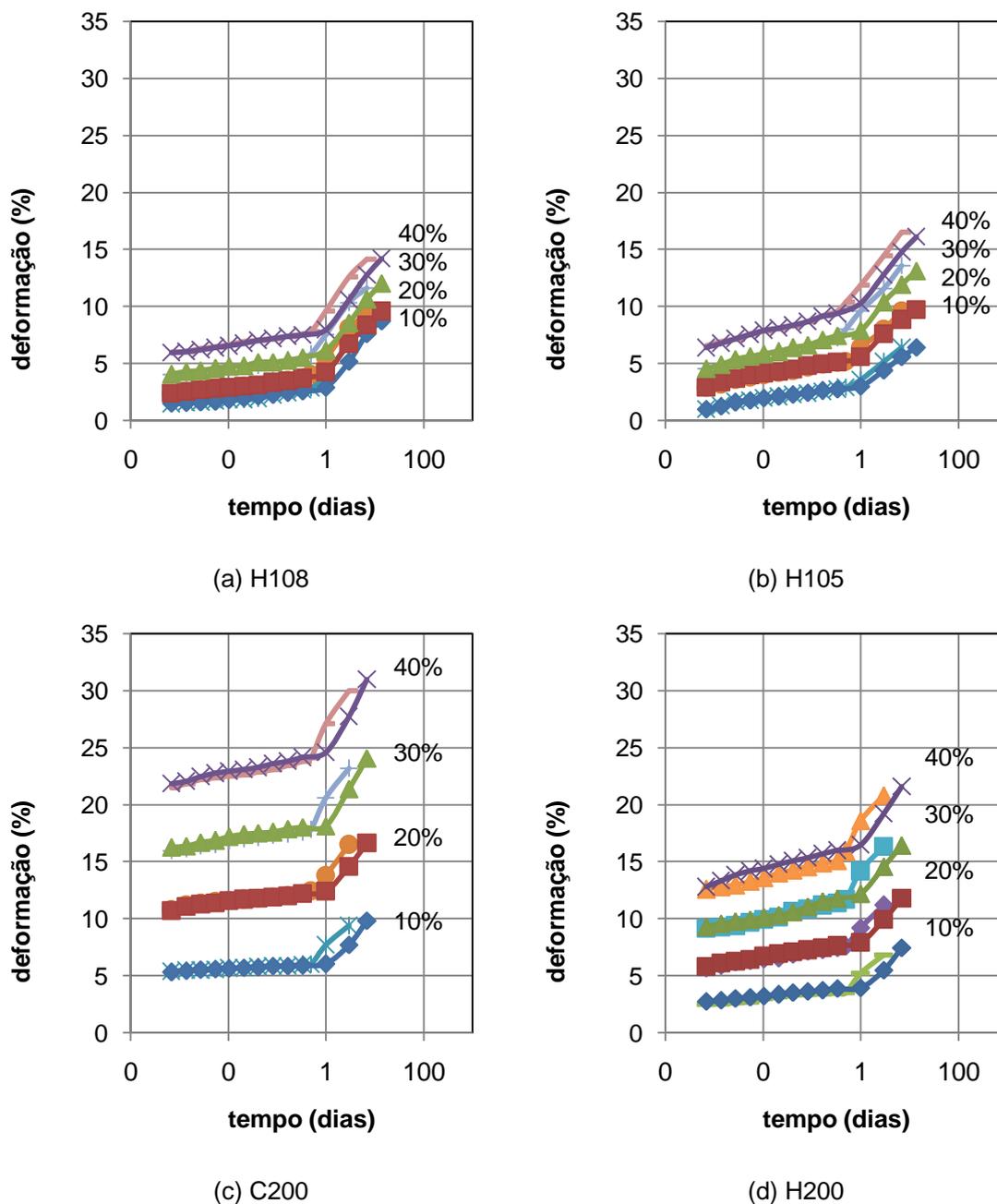
### *Degradação Simultânea*

Neste procedimento, foi utilizado o ensaio de fluência com aceleração por degradação na ciclagem por saturação e secagem. Como foi destacado na metodologia, foi realizada a mesma bateria de ensaios da fluência convencional. Utilizou-se o processo de aceleração, a fim de avaliar ensaio em condições próximas à realidade das FTT no campo de aplicação.

Foram realizados ensaios de fluência por tração e por puncionamento. E, para cada material, repetiu-se o procedimento com outra amostra. Os ensaios começaram da mesma forma que o convencional e o equipamento de saturação e secagem foi ligado para a primeira bateria de ensaios com 24 horas passadas. A repetição consistiu em realizar os mesmos ensaios ligando o equipamento com 12 horas. Desta maneira, pôde ser avaliada a consistência dos dados de fluência convencional e também dos ensaios acelerados.

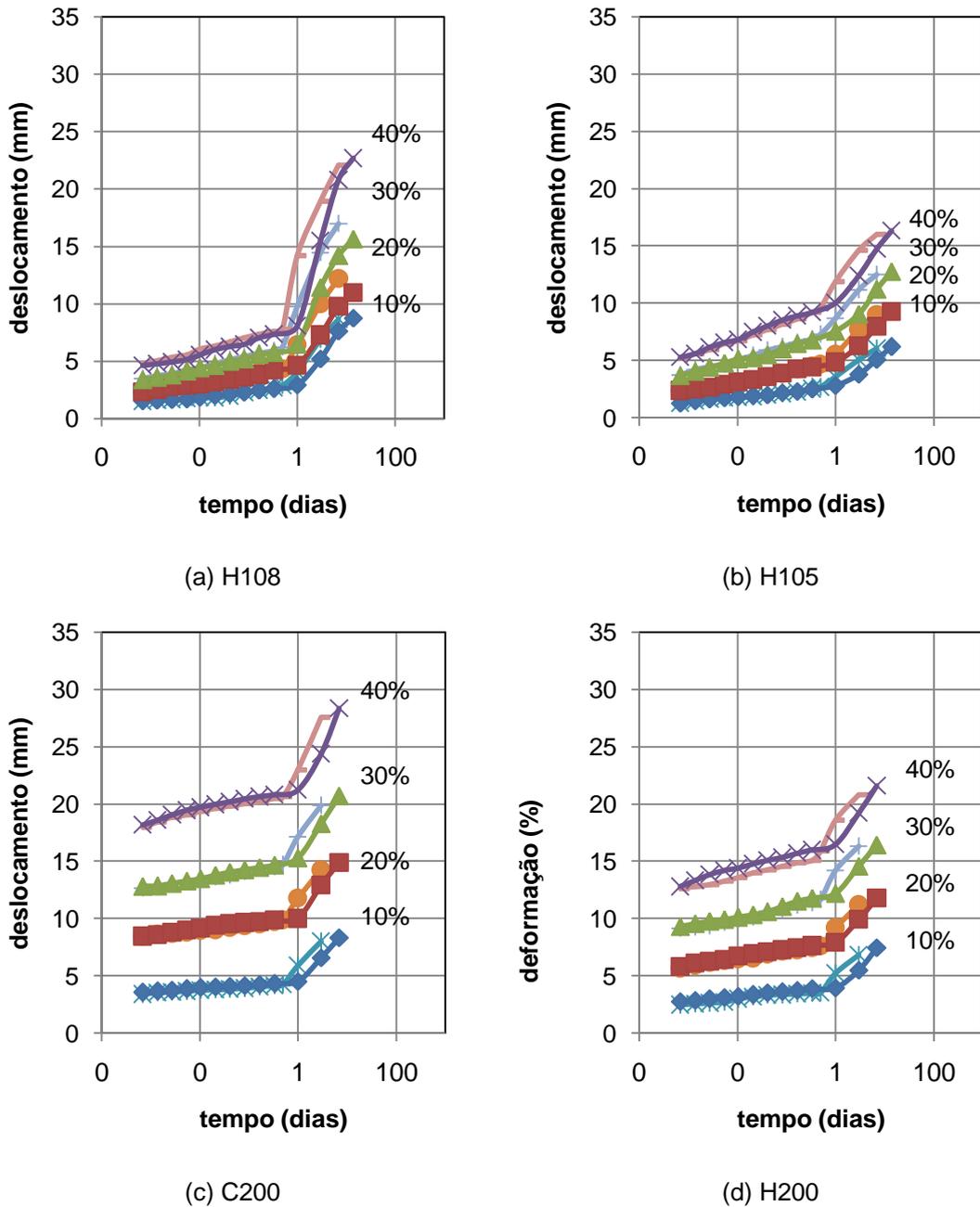
As Figuras Figura 4.26 e Figura 4.27 apresentam os resultados da fluência acelerada por tração e puncionamento. Observam-se as duas inclinações referentes aos dois momentos que o ensaio se procede. A sobreposição dos dados foi importante para mostrar que o sistema funcionou bem. As inclinações referentes à saturação e secagem apresentaram taxa de deformação elevada. Conforme esclarecido na revisão, é possível gerar modelos com estes dados partindo da origem e, conseqüentemente, estimar as deformações durante o início do ensaio.

Figura 4.26. Ensaios de fluência acelerada por tração em 4 níveis de carga



Os resultados da Figura 4.27 revelam que a taxa de deformação da fluência acelerada com ensaios de punção se mostrou elevada quando comparada ao ensaio convencional, bem como as inclinações referentes à saturação e secagem. Conforme destacado na revisão, é possível gerar modelos com estes dados partindo da origem e, conseqüentemente, estimarem-se as deformações, que foram calculadas pelo modelo de Kirchhoff. Com isso, a comparação entre os dados de tração e punção dos dados apresentados realmente ficaram mais próximos.

Figura 4.27. Ensaios de fluência acelerada por punção em 4 níveis de carga



### 4.3 Considerações Finais

Os materiais apresentados e caracterizados para a pesquisa foram submetidos a uma grande variedade de ensaios para projetos com foco em aplicação em FTT. Os resultados obtidos permitiram mostrar, isoladamente, as propriedades física, mecânica, hidráulica, de desempenho e de durabilidade dos geotêxteis.

Destaques foram dados à espectrofotometria com as análises de absorvância e transmitância dos materiais expostos às intempéries naturais no campo e aceleradas por radiação ultravioleta em laboratório. Análises e discussões serão expostas no próximo capítulo que avalia o comportamento da curva de acordo com a variação das bandas de carbonila.

Nas propriedades de desempenho são apresentados o efeito do confinamento em ensaios de punção. A utilização de granulometria e densidades de areias diferentes permitiram, em um primeiro olhar, perceber a contribuição da areia nas respostas de tensões maiores e a restrição das deformações nos geotêxteis. Já a exposição à radiação ultravioleta em 600 ciclos, 1,5GJ/m<sup>2</sup> de radiação acumulada, foi suficiente para diminuir a resistência dos materiais em mais de 70%, nos poliésteres e, próximos a 50%, nos polipropilenos.

Por fim, os ensaios de fluência acelerada destacaram a mesma tendência e pouca variabilidade em relação aos ensaios convencionais. A degradação por saturação e secagem, que acelerou o processo de fluência, foi responsável pelo aumento de deformações que alcançaram valores próximos à ruptura e permitiram análises de durabilidade com este procedimento.

## **5. ANÁLISES E DISCUSSÕES**

### **5.1 Considerações Iniciais**

Neste capítulo, são analisados e discutidos os resultados apresentados no Capítulo 4. Parte da caracterização básica foi analisada quanto à alterabilidade e durabilidade. São destacados os ensaios de caracterização física de tração, funcionamento e fluência. Amostras degradadas naturalmente no campo e de forma acelerada no laboratório foram ensaiadas e analisadas de forma a se integrarem aos modelos de durabilidade determinando os parâmetros de cada material estudado.

De acordo com o descrito na metodologia, a melhor forma de análise do comportamento a longo prazo dos materiais é avaliar suas propriedades após os processos de degradação. Com estes dados, além de resultados prévios das características do comportamento do material degradado, é possível gerar modelos que correlacionam a degradação natural no campo com a degradação acelerada em laboratório e, assim, determinar os parâmetros de durabilidade de cada material com qualquer um dos ensaios de caracterização.

### **5.2 Ensaio de Caracterização**

#### ***Propriedades Físicas***

Por ser uma análise não destrutiva, foi realizada primeiramente a caracterização das propriedades físicas dos materiais degradados com os ensaios de gramatura, espessura e porosidade, que são apresentados na Tabela 5.1. Optou-se por realizar ensaios apenas no último ciclo de degradação no campo e laboratório, que correspondem a 2 anos no campo e 2400 horas de ultravioleta no equipamento. Observa-se que, mesmo depois de longos períodos de exposição à degradação, a variação da propriedade foi relativamente pequena.

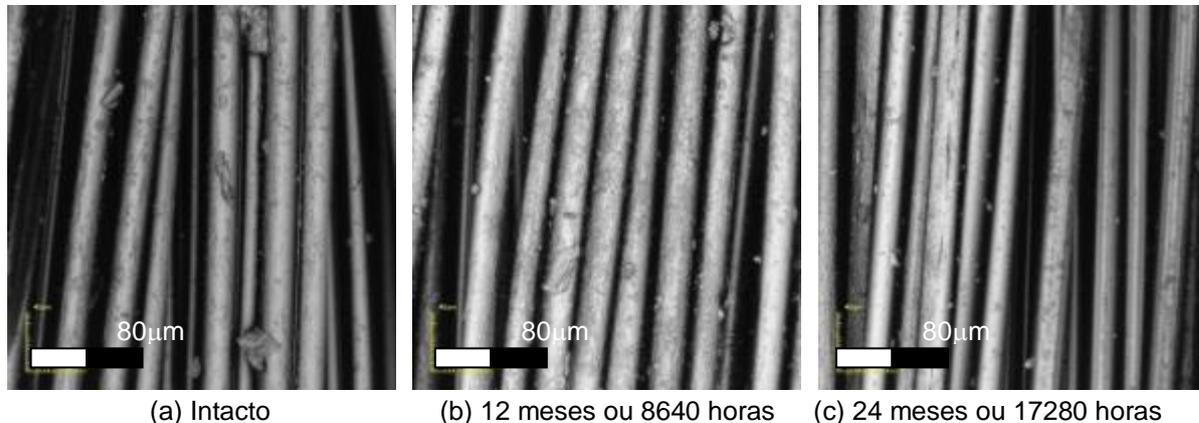
Pode-se dizer que não houve mudanças nos polipropilenos PP500 e PP925. Além das variações das propriedades avaliadas serem pequenas, os desvios padrões deixam evidente que os valores encontrados não mudaram significativamente. Já os poliésteres PET340 e PET740 apresentaram diferenças em algumas das propriedades, devido, principalmente, ao efeito da colmatação.

**Tabela 5.1: Ensaios de caracterização física**

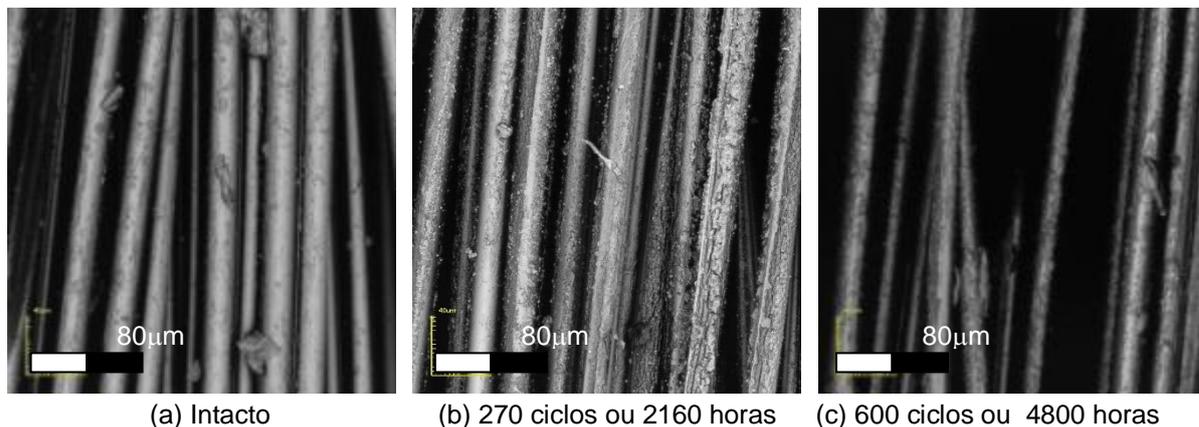
Propriedade	Material											
	PET340			PP500			PET740			PP925		
	intacto	2 anos	2400 horas									
$\mu_A$ (g/m <sup>2</sup> )	340 ± 8	352 ± 11	356 ± 17	500 ± 9	492 ± 30	478 ± 21	740 ± 23	782 ± 36	770 ± 41	925 ± 25	908 ± 30	903 ± 33
$t_{GTx}$ (mm)	0,51 ± 0,02	0,62 ± 0,06	0,58 ± 0,05	1,53 ± 0,04	1,56 ± 0,04	1,54 ± 0,06	1,11 ± 0,01	1,21 ± 0,03	1,19 ± 0,05	2,62 ± 0,06	2,60 ± 0,08	2,59 ± 0,11
$n_{GTx}$ (%)	49 ± 1	56 ± 3	53 ± 2	62 ± 1	63 ± 1	63 ± 1	49 ± 1	50 ± 2	50 ± 1	58 ± 1	59 ± 2	59 ± 1

Para avaliar as mudanças físicas das amostras, foram realizadas microscopias em todos os materiais degradados naturalmente no campo e aceleradamente no laboratório. As Figuras Figura 5.1 a Figura 5.10 contêm os últimos estágios de degradação referentes ao modo de exposição e, no Apêndice A, encontram-se todas as micrografias. As primeiras imagens são referentes ao poliéster PET340. Observe-se o aumento do diâmetro dos filamentos e sua textura já não está tão lisa.

**Figura 5.1. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET340 Degradado no Campo**

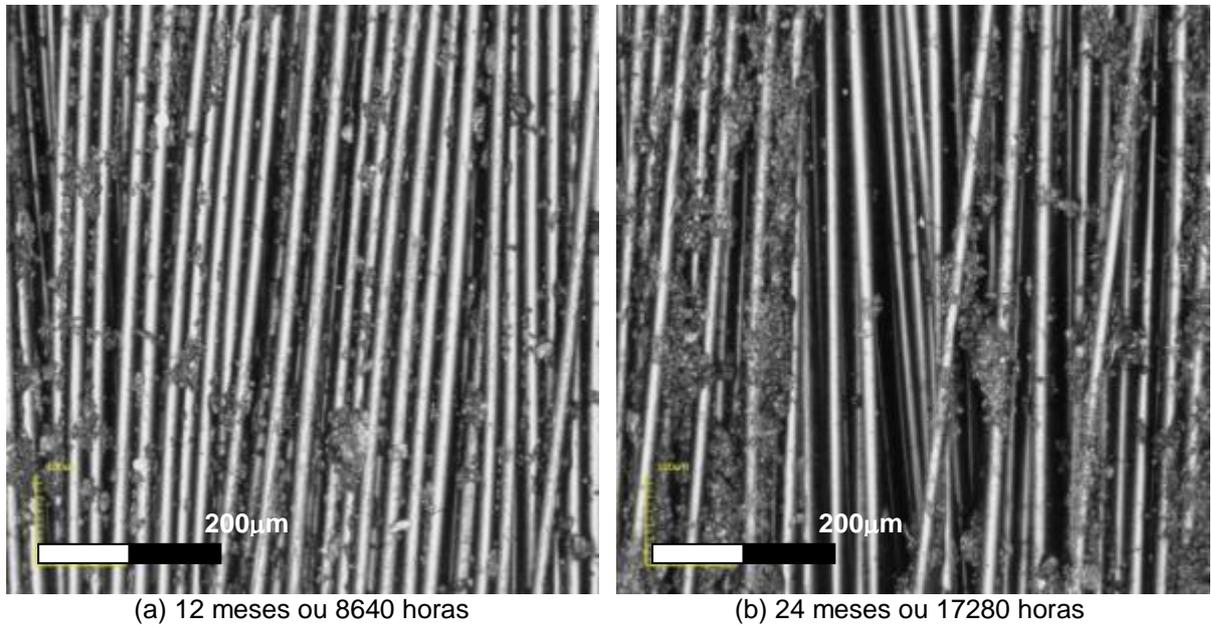


**Figura 5.2. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET340 Degradado no Laboratório**



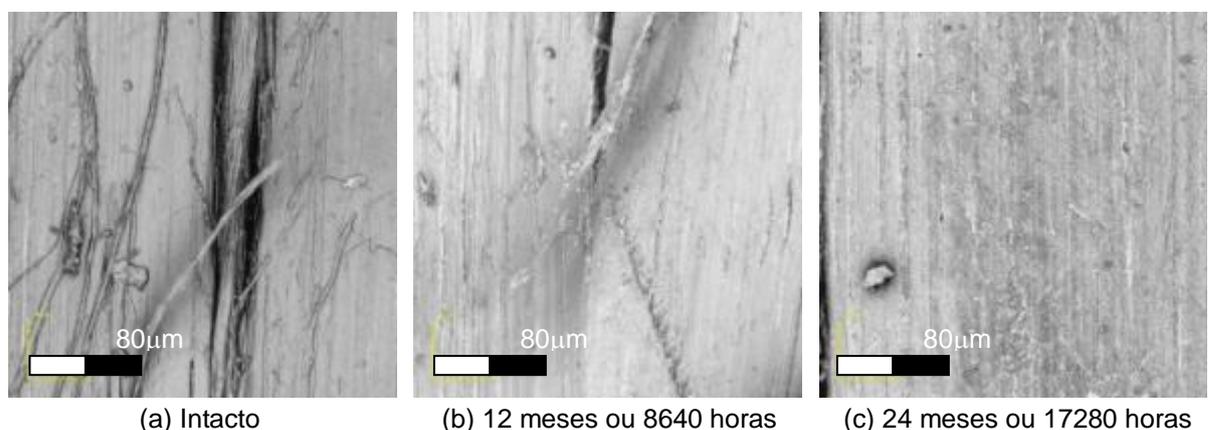
O aumento da porosidade e da espessura do geotêxtil PET340 foi a diferença notável e as imagens ajudam nestas conclusões. Além disso, como foi caracterizado, o efeito da colmatção pode ter influenciado nestes resultados (Figura 5.3).

**Figura 5.3. Colmatção do PET340 por exposição à degradação natural no Campo**

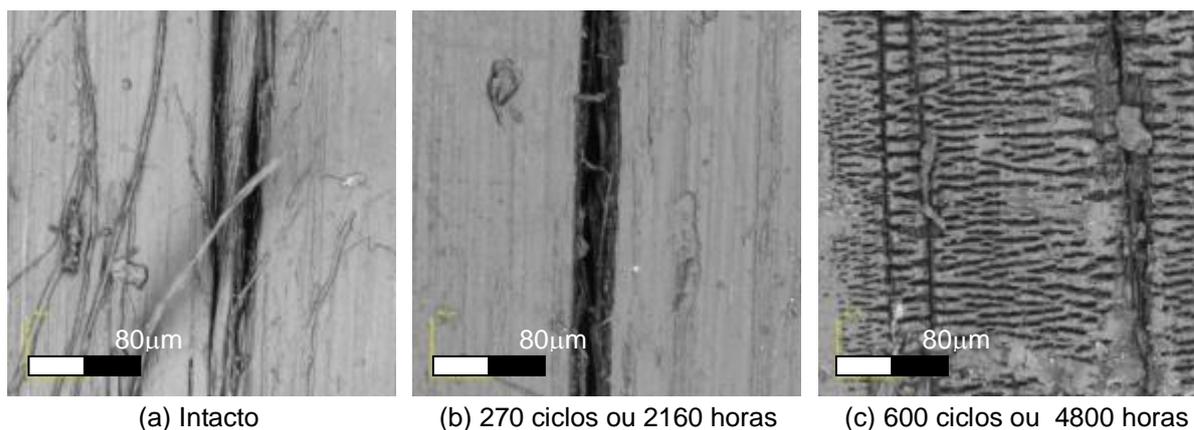


Diferentemente do poliéster PET340, o geotêxtil de polipropileno formado por laminetes, o PP500, não apresentou diferenças notáveis em suas propriedades físicas. Na microscopia do material degradado no campo da Figura 5.4, percebem-se fibras desprendidas. Possivelmente, foram desprendidas do laminete com o tempo e sua textura também deixa de ser lisa, como é mais evidente no material intacto. Já no material degradado no laboratório, apresentado pela Figura 5.5, houve maior alteração na superfície do material.

**Figura 5.4. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP500 Degradado no Campo**

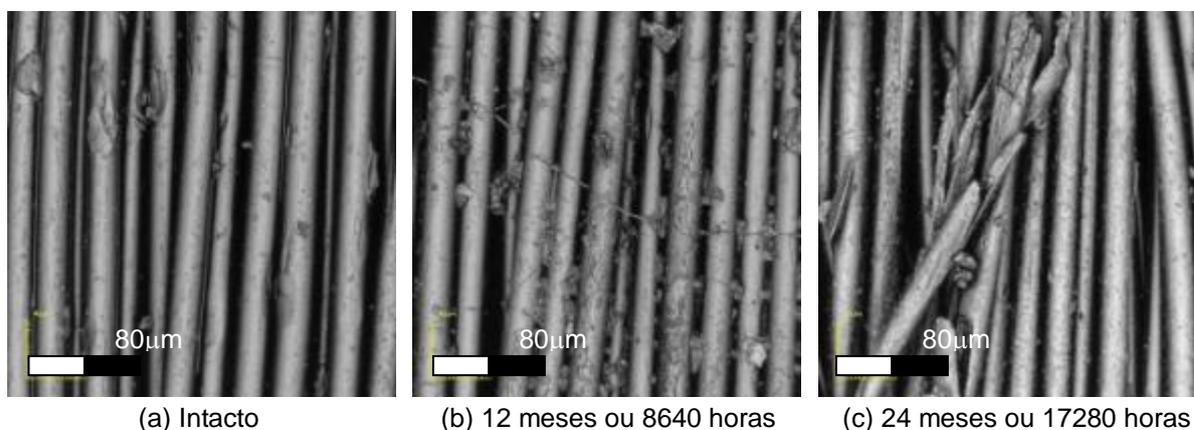


**Figura 5.5. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP500 Degradado no Laboratório**

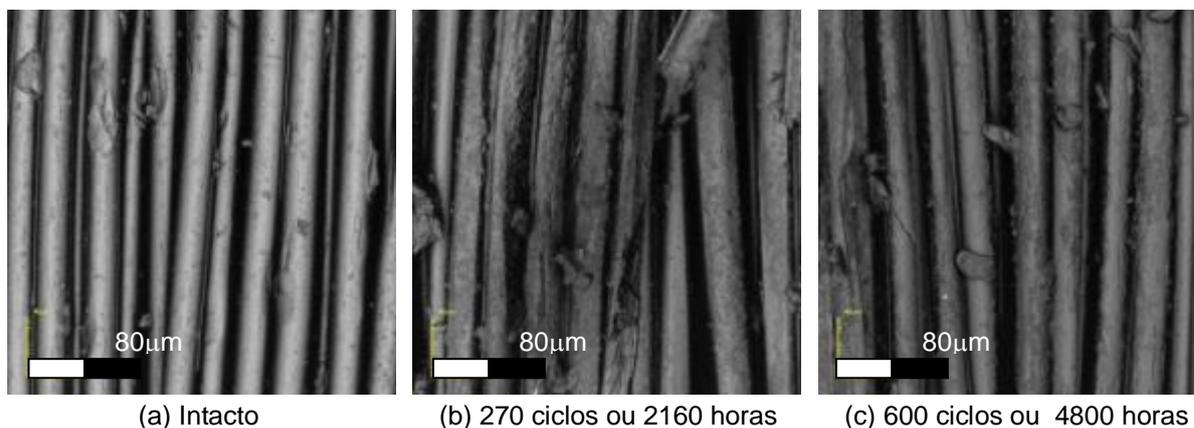


O outro geotêxtil de poliéster, formado por multifilamentos, PET740, apresentou situações similares ao PET340. A maior diferença ficou por conta dos valores da gramatura que aumentaram em relação ao material intacto. Já as outras propriedades, pouco variaram. O material aparenta comprometimento de alguns filamentos rompidos, aumento no seu diâmetro e rugosidade na textura (Figuras Figura 5.6 e Figura 5.7). O efeito da colmatação é destacado na Figura 5.8.

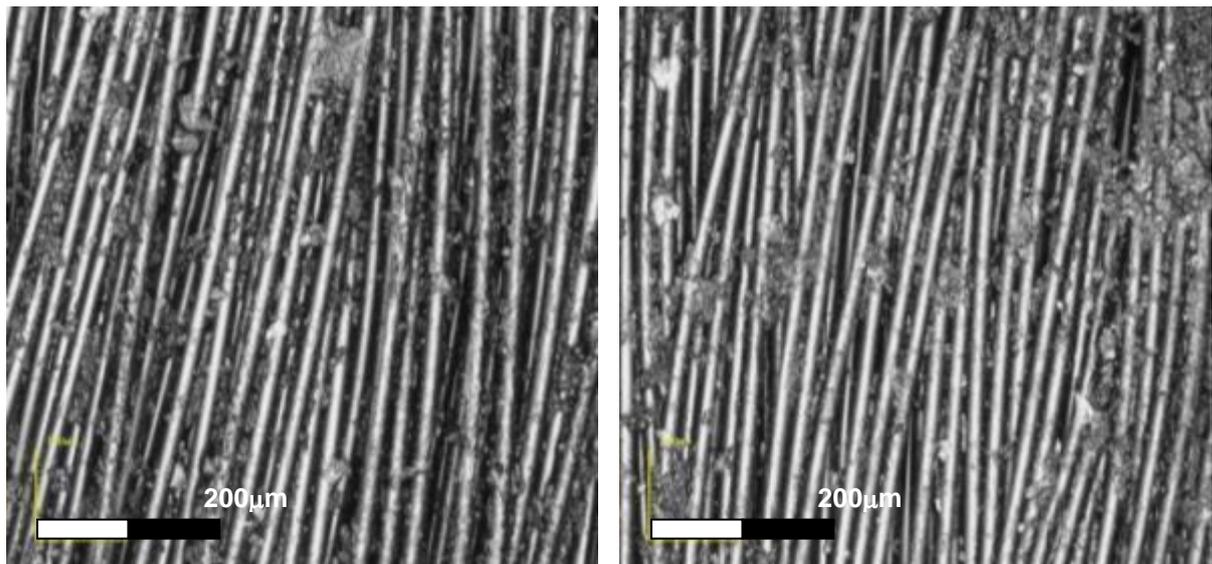
**Figura 5.6. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET740 Degradado no Campo**



**Figura 5.7. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET740 Degradado no Laboratório**



**Figura 5.8. Colmatação do PET740 por exposição à degradação natural no Campo**

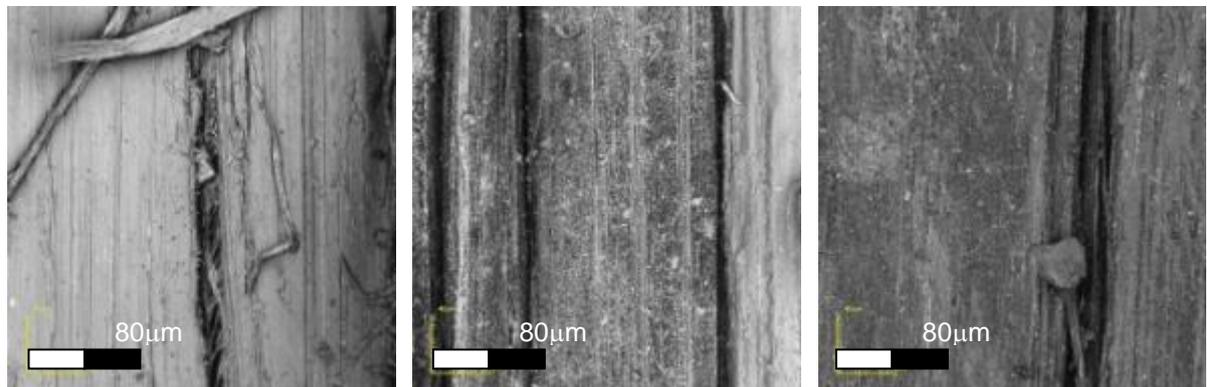


(a) 12 meses ou 8640 horas

(b) 24 meses ou 17280 horas

O PP925 aparentou comportamento similar ao PP500 com suas propriedades físicas pouco afetadas. Nas imagens das Figura 5.9 e Figura 5.10, nota-se a textura com comprometimento dos laminetes se dividindo com surgimento de fissuras.

**Figura 5.9. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP925 Degradado no Campo**

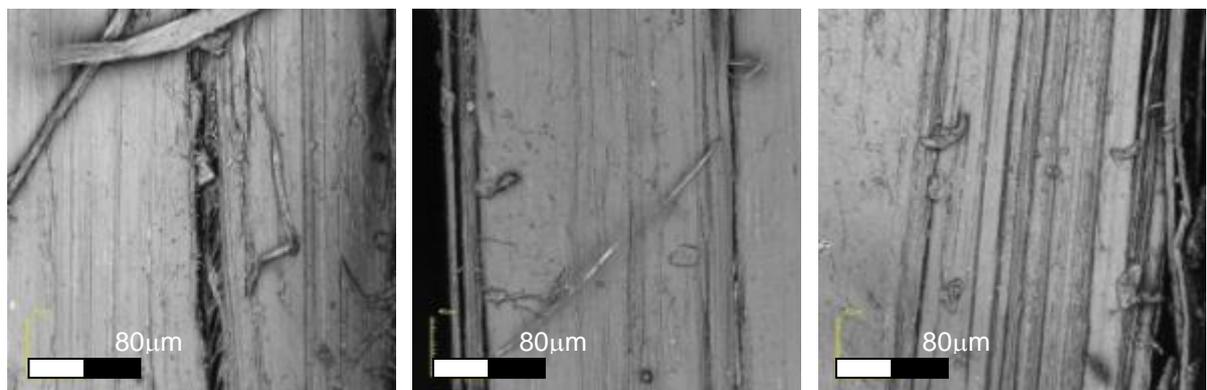


(a) Intacto

(b) 12 meses ou 8640 horas

(c) 24 meses ou 17280 horas

**Figura 5.10. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP925 Degradado no Laboratório**



(a) Intacto

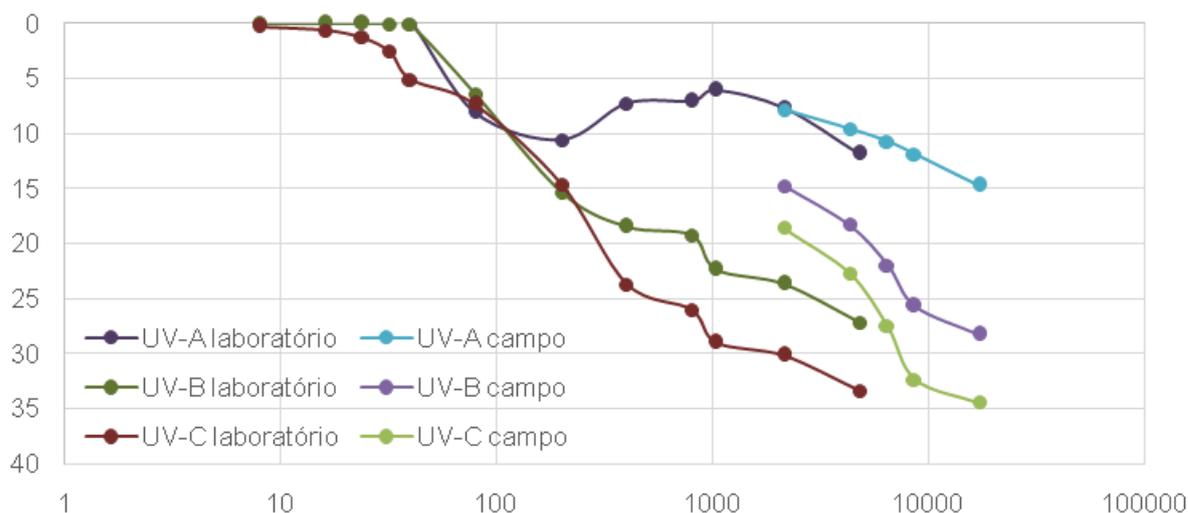
(b) 270 ciclos ou 2160 horas

(c) 600 ciclos ou 4800 horas

Diferentemente das propriedades físicas já apresentadas, a espectrofotometria revela resultados qualitativos e quantitativos sobre a alteração do material após os procedimentos de degradação. Como já foi descrito na metodologia, analisaram-se as amostras por incidência de UV-visível e infravermelho. É importante destacar que, os ensaios são usualmente feitos em materiais na forma líquida. Quando sólida, aconselha-se triturar e prensar os corpos de prova, além de garantir que o conjunto seja translúcido. Porém, estes procedimentos não permitiriam avaliar a degradação, uma vez que seria necessário alterar o estado físico da amostra. Desta maneira, optou-se por realizar os ensaios com as amostras sem nenhum tipo de intervenção ao material, ou seja, sem triturar ou dissolver.

Os dados de absorbância com o ultravioleta visível permitiram avaliar o comportamento do material após a exposição natural no campo e acelerada no laboratório. Com os dados das curvas dos ensaios, foram integradas as áreas do gráfico correspondentes a cada intervalo de comprimento de onda equivalentes aos espectros ultravioleta e visível. Dessa maneira, pôde-se determinar o quanto variou a absorção em relação ao material intacto. Foram avaliados apenas os materiais PET340 e PET740, uma vez que os polipropilenos apresentaram diferença de absorbância desprezível. Estes materiais, PP500 e PP925, são pretos e se mostraram resistentes aos raios ultravioleta, o que pode ter impossibilitado analisar leituras de absorbância. Os resultados são expostos na Figura 5.11, com a amostra PET340 e Figura 5.12, com a amostra PET740.

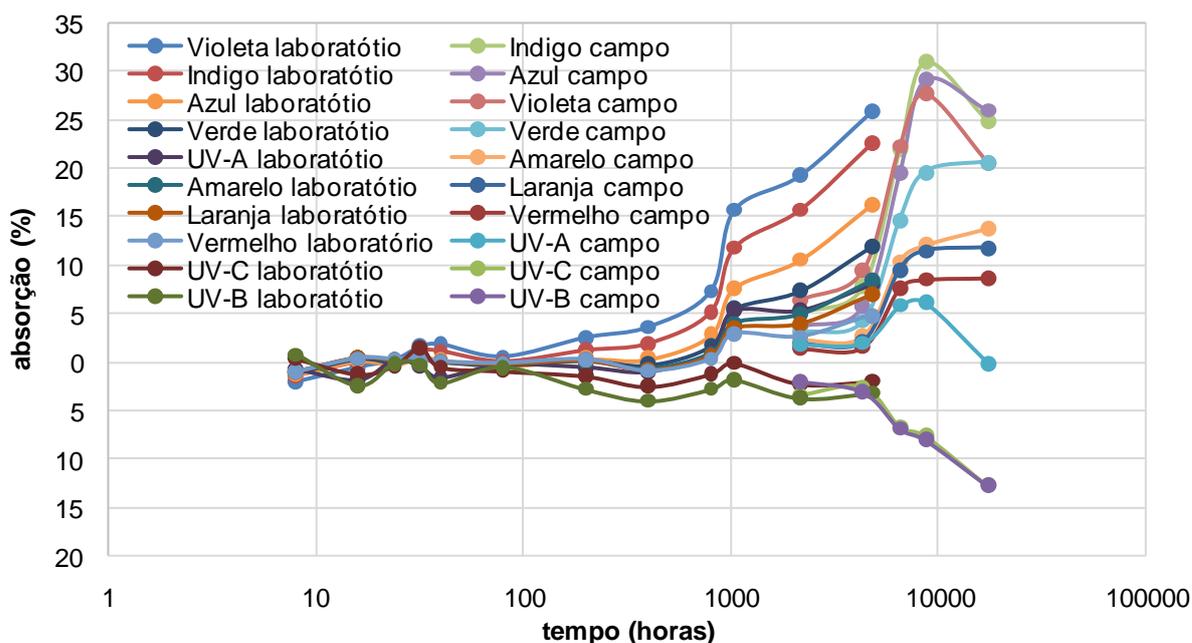
**Figura 5.11. Variação da absorção do espectro UV-Vis na amostra PET340**



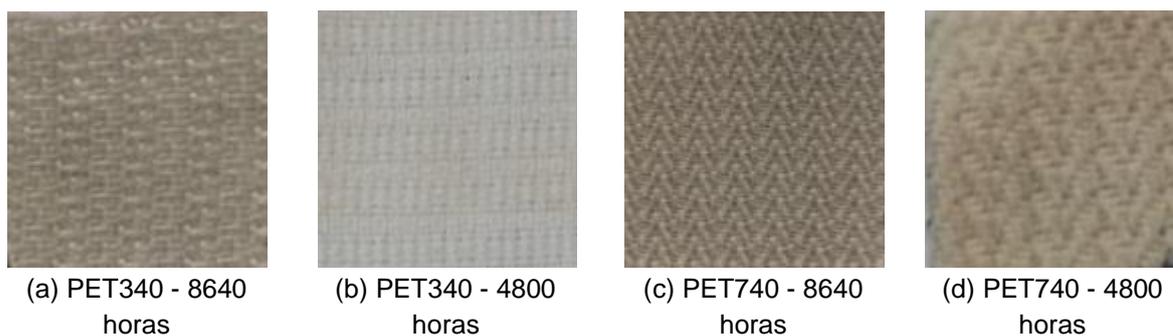
Na Figura 5.11, observa-se que o material degradado absorve cada vez menos radiação ultravioleta em relação ao material intacto. Tanto a exposição à radiação natural no campo, quanto a radiação acelerada no laboratório diminuíram a absorção dos raios UV-B e UV-C em valores de até 28 e 34%, respectivamente, enquanto a radiação UV-A ficou próxima a 15%. Houve mudança na coloração das amostras degradadas no campo e no laboratório, que podem ser observadas nos resultados.

A Figura 5.12, por sua vez, exibe o material PET740, com mesma composição polimérica do PET340, porém com maior gramatura e costura diferente. Destaca-se a diminuição da absorção dos espectros UV-B e UV-C com o tempo. Já nos comprimentos de onda UV-A e visível, houve aumento da absorção. De fato, a coloração foi alterada. Tanto no PET740, quanto no PET340, os corpos de prova ficaram em tons de amarelo e marrom, como ilustrado pela Figura 5.13.

**Figura 5.12. Variação da absorção do espectro UV-Vis na amostra PET740**



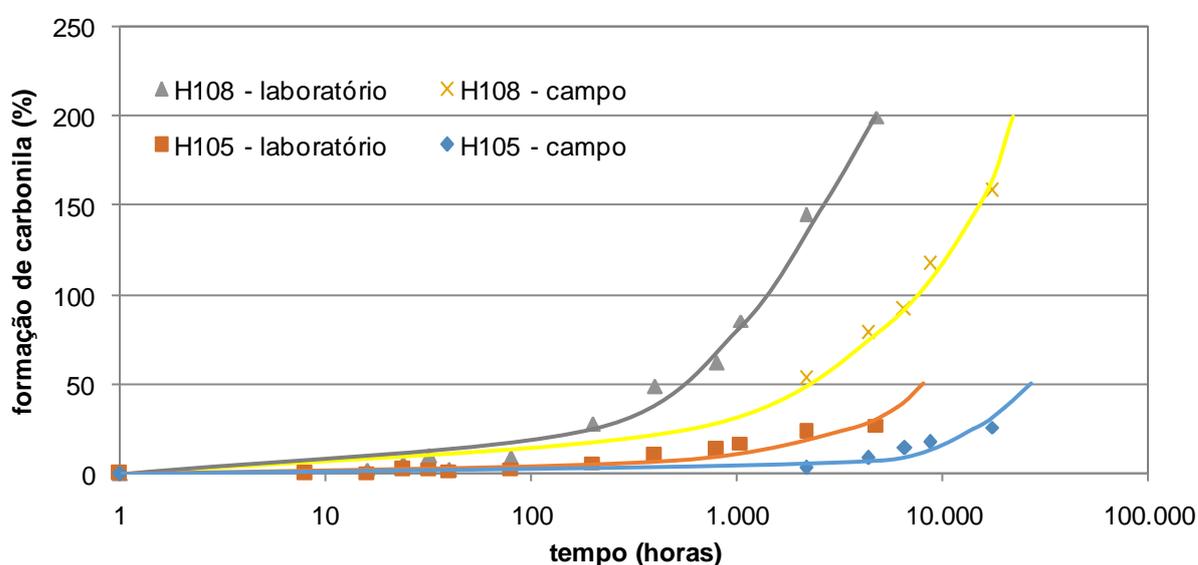
**Figura 5.13. Variação da coloração das amostras**



A espectroscopia por FTIR apresenta os resultados das amostras PET340 e PP500. Não foi possível a leitura de transmitância nos geotêxteis PET740 e PP925, por sua espessura impedir o feixe de luz infravermelha.

Nesta análise, foram comparadas, de forma similar aos dados de UV-visível, as áreas do gráfico correspondente ao intervalo de comprimento de onda equivalente à formação da banda de carbonila (C=O) dos materiais degradados com o material intacto. A Figura 5.14 expõe a formação de carbonila no PET340 que alcançou valores na ordem de 200% em laboratório e 160% no campo. Já no PP500, tanto no campo quanto no laboratório, os valores aumentaram na ordem de 26%.

Figura 5.14. FTIR das amostras PET340 e PP500



### ***Propriedades Mecânicas***

#### *Tração*

O ensaio aponta muitas variáveis que influenciam diretamente o resultado dos ensaios. Durante o período de estudo da tese, foram realizados testes em uma variedade de gramatura de geotêxteis tecidos, além dos quatro já mencionados na tese. Na revisão bibliográfica, alguns são destacados de acordo com o desempenho nos ensaios de caracterização mecânica utilizando outras variações. Desta maneira, é importante destacar 3 procedimentos: o tipo de garra, a velocidade do ensaio em função da distância entre as referências no corpo de prova e a sua largura.

### Largura dos Corpos de Prova

Com as garras de aperto ao redor da amostra, é possível realizar ensaios em várias larguras de corpos de prova diferentes. Podem ser utilizadas medidas entre 5 e 10 cm no par de garras menor e entre 15 e 20 cm no par de garras maior. Realizar ensaios em larguras de corpo de prova menores que 15 cm nas garras maiores não garantem boa fixação e, conseqüentemente, deslizamentos.

As Figura 5.15 até Figura 5.18 apresentam os resultados médios dos ensaios realizados nas 4 faixas de larguras citadas dos 4 materiais utilizados na pesquisa e a Tabela 5.2, contém os dados que resumem o comportamento geral dos ensaios e a estatística com desvio padrão e coeficiente de correlação.

Figura 5.15. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PET340

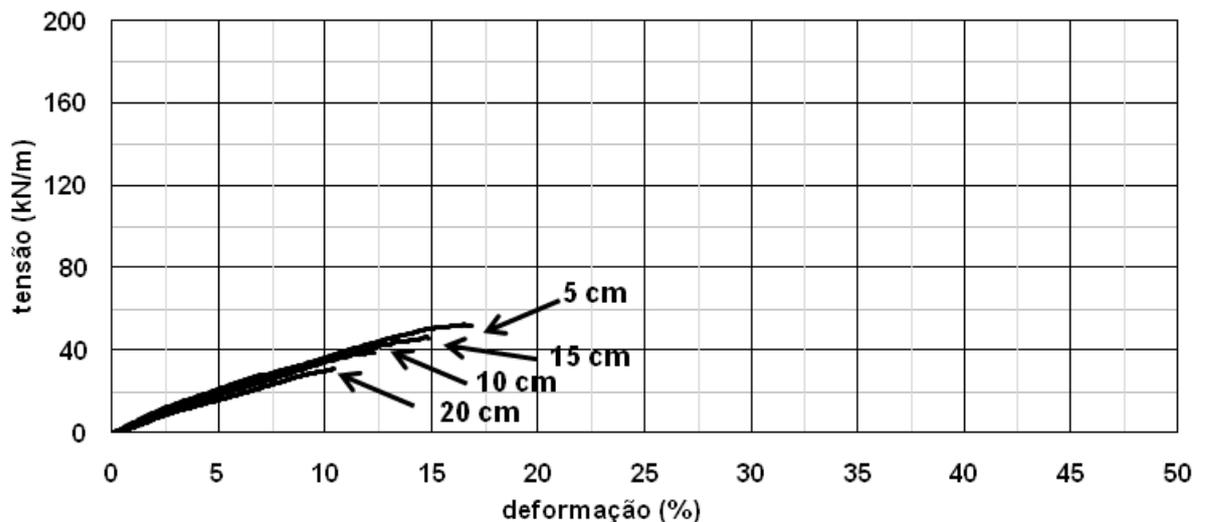


Figura 5.16. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PP500

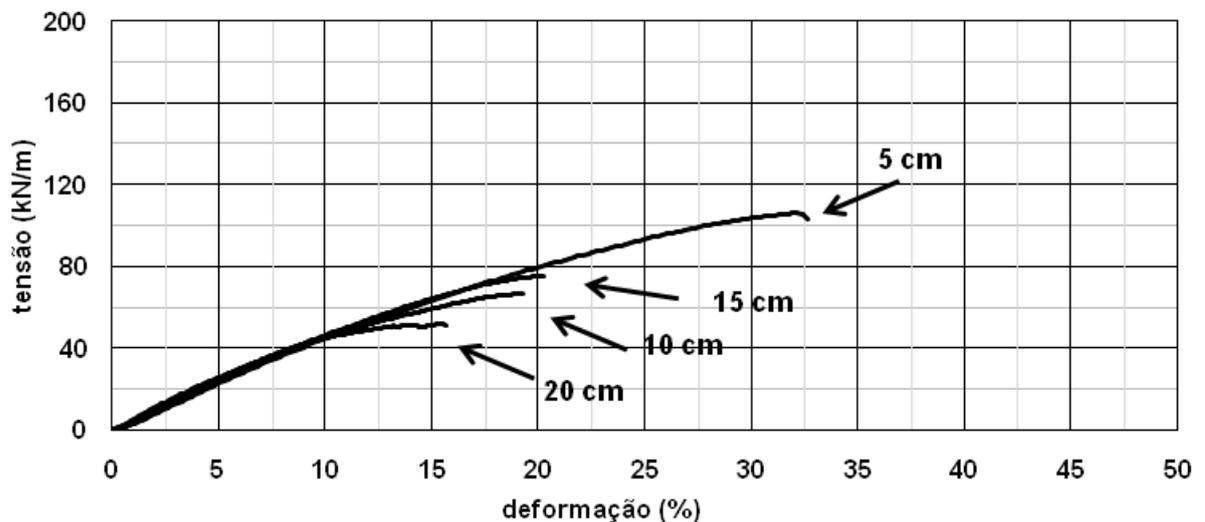


Figura 5.17. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PET740

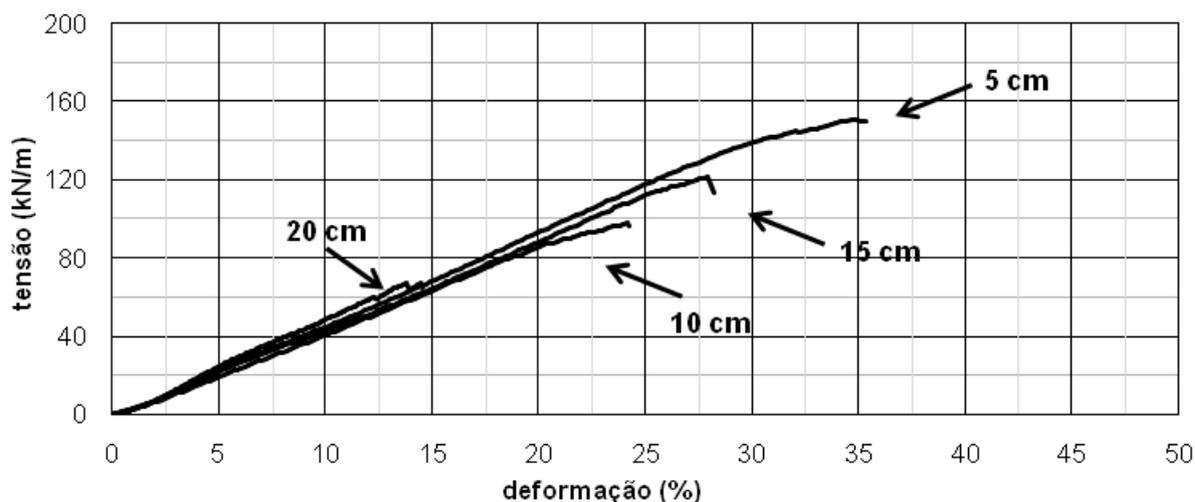


Figura 5.18. Média dos ensaios de tração direta com larguras diferentes do PP925

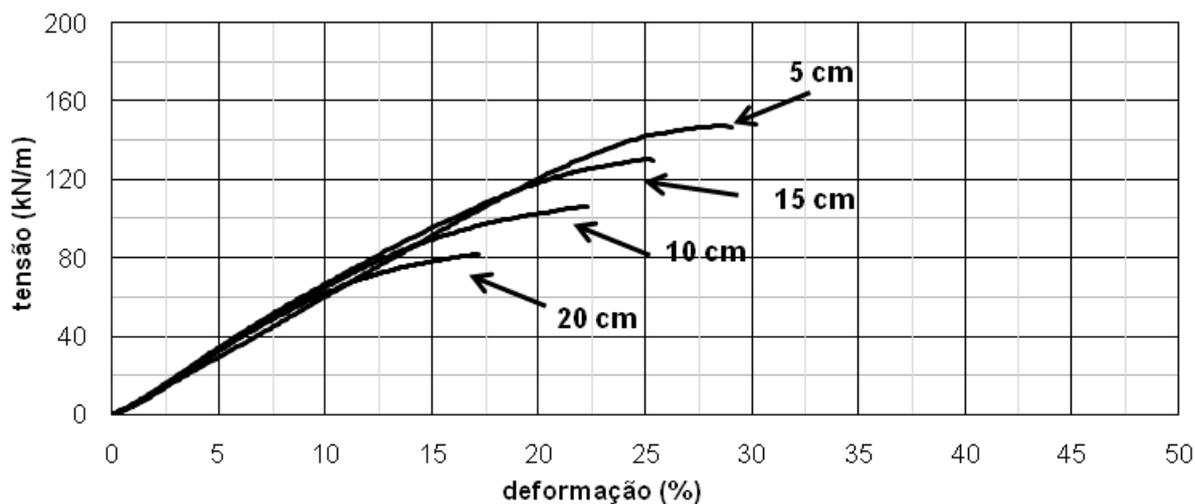


Tabela 5.2: Resultados dos ensaios de tração direta com larguras diferentes dos geotêxteis

Amostra	Largura (mm)	$T_{\text{máx}}$ (kN/m)	Desvio (kN/m)	CV (%)	$\epsilon_{\text{máx}}$ (%)	Desvio (%)	CV (%)
PET340	50	52,48	1,62	3,09	16,55	1,75	10,56
	100	39,31	3,12	7,94	12,18	1,21	9,93
	150	46,62	4,45	9,55	14,81	1,34	9,05
	200	30,95	2,71	8,75	8,07	0,87	10,78
PP500	50	106,15	2,05	1,94	32,11	1,30	4,04
	100	66,61	4,11	6,17	19,29	1,1	5,70
	150	75,32	5,33	7,08	20,12	1,05	5,22
PET740	200	51,90	3,12	6,01	15,66	0,94	6,00
	50	150,74	5,23	3,47	34,85	1,82	5,22
	100	97,95	3,87	3,95	24,14	1,54	6,38
	150	121,56	5,34	4,39	27,89	1,68	6,02
PP925	200	67,23	2,86	4,25	14,54	1,02	7,02
	50	147,16	2,17	1,47	28,53	0,83	2,92
	100	106,36	4,71	4,43	22,25	2,02	9,08
	150	130,26	3,78	2,90	25,16	1,65	6,56
	200	81,90	2,94	3,59	17,20	1,39	8,08

Conforme pode ser observado nas Figuras e na Tabela 5.2, não houve variação significativa da rigidez dos geotêxteis tecidos. Porém, o comportamento final não foi o mesmo. Nota-se que o aperto dos parafusos, com o aumento da largura, perde eficiência em cada um dos pares de garras utilizados. Possivelmente, os corpos de prova na área central da garra não ficam completamente presos, principalmente nos materiais de maior gramatura, PET740 e PP925. A garra de aperto ao redor da amostra obteve maiores tensões com amostras de 5 cm de largura. Isso, de fato, acontece e as análises continuaram a seguir com esta largura de corpo de prova, já que a pesquisa contempla várias análises considerando uso da faixa estreita e aperto ao redor da amostra. Com gramaturas inferiores a 300g/m<sup>2</sup>, Dias Filho et al (2014a) não obtiveram mudança nos resultados de tensão e deformação. Os valores ficaram dentro da média de catálogo do fabricante.

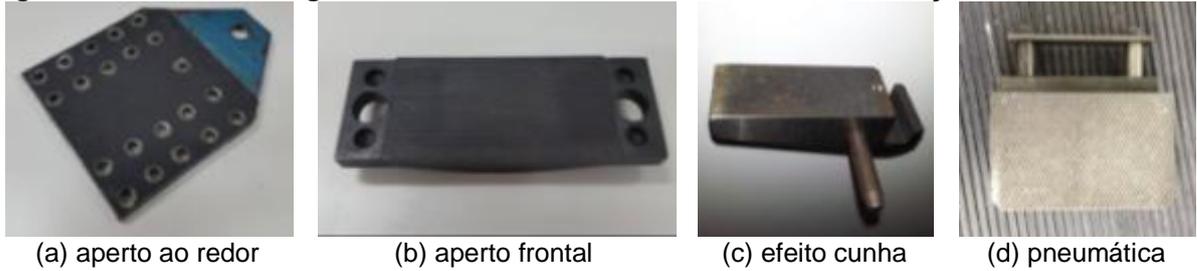
### *Tipo de Garra*

Para avaliar o tipo de garra, procurou-se estudar o comportamento da tensão e deformação dos geotêxteis tecidos em mais três garras diferentes. A Tabela 5.3 exhibe os resultados e a Figura 5.19 detalha as garras e o tipo de aperto.

**Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de resistência à tração em diferentes garras**

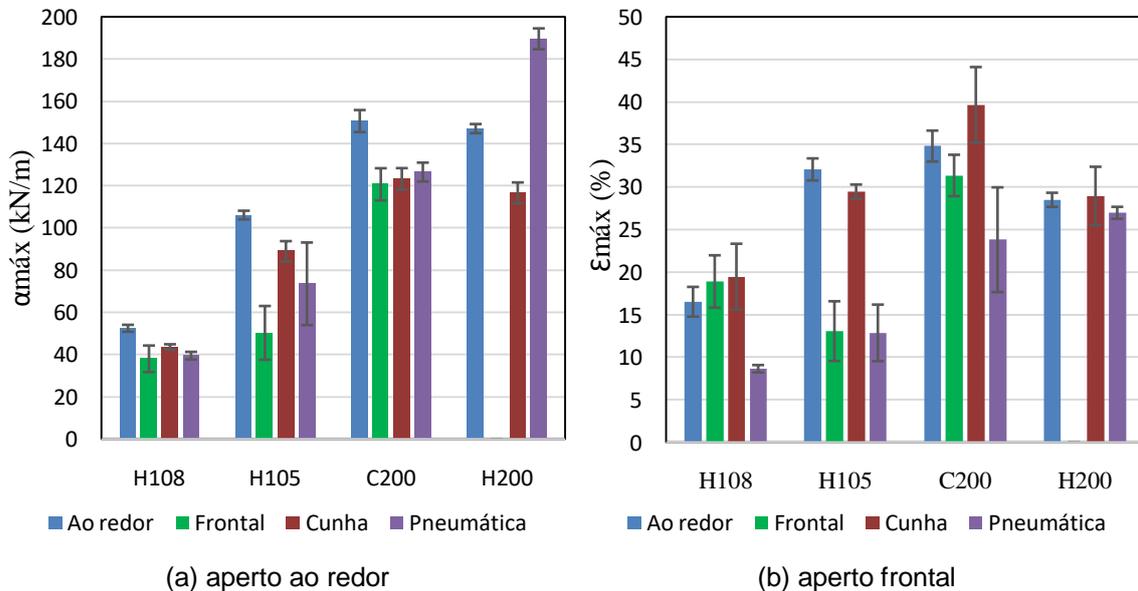
Material	Tipo de Garra	T <sub>máx</sub> (kN/m)	Desvio (kN/m)	CV(%)	ε <sub>máx</sub> (%)	Desvio (%)	CV (%)
PET340	Aperto ao redor da amostra	52,5	1,6	3,1%	16,6%	1,8%	10,6%
	Aperto frontal	38,0	6,3	16,6%	18,9%	3,1%	16,2%
	Efeito de cunha	43,6	1,3	2,9%	19,5%	3,9%	19,9%
	Efeito pneumático	39,5	1,8	4,6%	8,7%	0,4%	4,9%
	Média	43,4	6,5	15,0%	16,0%	5,0%	31,3%
PP500	Aperto ao redor da amostra	106,2	1,6	1,9%	32,1%	1,3%	4,4%
	Aperto frontal	50,3	12,7	25,3%	13,1%	3,5%	26,8%
	Efeito de cunha	89,0	4,8	5,4%	29,5%	0,8%	2,8%
	Efeito pneumático	73,6	19,6	26,6%	12,9%	3,3%	25,8%
	Média	78,5	21,9	27,9%	20,7%	9,0%	43,3%
PET740	Aperto ao redor da amostra	150,7	5,2	3,5%	34,9%	1,8%	5,2%
	Aperto frontal	120,7	7,6	6,3%	31,4%	2,4%	7,7%
	Efeito de cunha	123,3	5,1	4,1%	39,7%	4,4%	11,2%
	Efeito pneumático	126,5	4,5	3,5%	23,8%	6,2%	25,8%
	Média	130	13,1	10,1%	29,9%	7,3%	24,4%
PP925	Aperto ao redor da amostra	155,1	14,8	9,5%	41,4%	12,5%	30,2%
	Aperto frontal	-	-	-	-	-	-
	Efeito de cunha	116,7	4,9	4,2%	29,0%	3,4%	11,9%
	Efeito pneumático	189,7	2,6	1,4%	27,0%	0,7%	2,6%
	Média	153,8	36,5	23,7%	32,5%	7,8%	24,1%

**Figura 5.19. Detalhe das garras utilizadas nos ensaios de resistência à tração**



Os gráficos da Figura 5.20 apresentam as tensões e deformações em cada uma das garras para melhor comparação dos efeitos de cada uma. Não foi possível realizar ensaio com a amostra PP925 na garra auto travante por aperto frontal, devido ao escorregamento do material e à não caracterização da ruptura no ensaio.

**Figura 5.20. Gráfico com os resultados dos ensaios de resistência à tração nas garras**

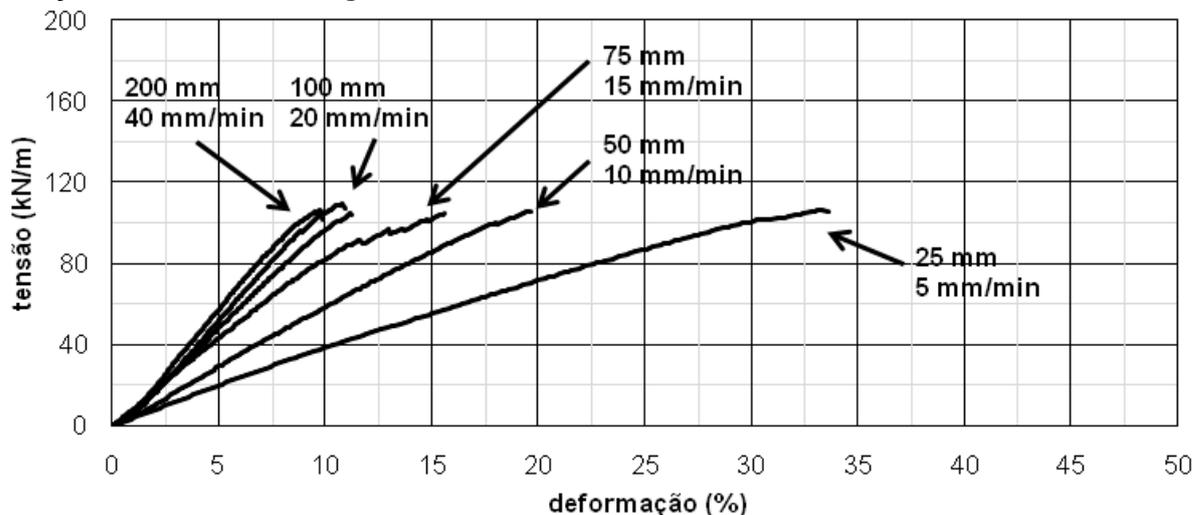


Houve muita dispersão na comparação entre as garras e podem-se obter algumas informações importantes dos comportamentos revelados. A garra pneumática apresentou as menores deformações. Os módulos de rigidez dos materiais foram similares nas garras de aperto ao redor da amostra, frontal e por efeito cunha, variando para o material PP925 com a garra pneumática. As garras exibiram deslizamento e não alcançaram os valores de ruptura dos materiais de gramaturas acima dos 500g/m<sup>2</sup>. Para efeito de pesquisa, a correlação entre os dados normalizados permite uma boa avaliação dos resultados, bem como a utilização de tensões de trabalho referentes à resistência de catálogo do fabricante e às propriedades de deformação e rigidez usadas na caracterização deste.

## Velocidade de Ensaio

Sabendo que os materiais apresentaram deslizamento e que o sistema de medições continuaria a considerar, nos deslocamentos, a distância entre garras, procurou-se avaliar o quanto a velocidade poderia influenciar na medição das deformações nos corpos de prova. Foi realizada uma bateria de ensaios com variação da distância entre garras e os resultados médios são ilustrados na Figura 5.21 e na Tabela 5.4, utilizando apenas a amostra PP500, que apresentou resistência média mais próxima ao descrito em catálogo.

**Figura 5.21. Comportamento da tensão e deformação no ensaio de resistência à tração com variação da distância entre garras do PP500**



**Tabela 5.4: Resultado dos ensaios de resistência à tração com variação da distância entre garras do PP500**

Amostra	Entre garras (mm)	T <sub>máx</sub> (kN/m)	Desvio (kN/m)	CV (%)	ε <sub>máx</sub> (%)	Desvio (%)	CV (%)
PP500	25	105,53	3,12	2,96	19,21	1,10	5,73
	50	106,15	2,05	1,94	32,11	1,30	4,04
	75	104,32	5,33	5,11	15,31	1,05	6,86
	100	104,72	2,71	2,59	10,97	0,94	8,57
	150	108,87	7,49	6,88	10,58	1,05	9,92
	200	104,03	6,36	6,11	9,57	0,82	8,57

Observa-se o escorregamento do geotêxtil e que o aumento da distância entre as garras tende a influenciar menos na deformação. Na pesquisa, optou-se por utilizar largura de 5 cm e, entre garras, de 2,5 cm, pois o trabalho com amostras degradadas exigem grande número de corpos de prova. Desta forma, considerações devem ser feitas em relação ao efeito do escorregamento.

## *Puncionamento*

No ensaio de puncionamento, é destacada, na revisão bibliográfica, a caracterização do efeito escala e tração indireta com garras de diferentes tamanhos. Conforme a metodologia descreve, os dados dos ensaios são analisados em termos de tensão e deformação. A seguir, são apresentados estes procedimentos, que são importantes para a tese, com os principais resultados.

### *Efeito Escala do Suporte*

Foram utilizadas as três garras do laboratório. Os resultados estão presentes nas Figura 5.22 até Figura 5.25, bem como a Tabela 5.5, com o resumo dos ensaios caracterizados pelos geotêxteis e o diâmetro dos pistões CBR.

O efeito escala apresentou diferenças no desenvolvimento da curva tensão e deformação. A garra, que utiliza o pistão denominado nesta pesquisa por microCBR, que possui 13 mm de diâmetro, só obteve bom desempenho com o geotêxtil de menos espessura, PET340. Nesta avaliação, é importante destacar, que a textura do geossintético e sua gramatura influenciam diretamente nos resultados. O atrito entre garra e geotêxtil é fundamental para que o ensaio ocorra sem problemas e, na comparação com o efeito escala, não houve boa resposta.

Os geotêxteis PP500 e PET740 mostraram boa interação com as garras, diferentemente do PP925, que obteve maiores diferenças entre os resultados e houve escorregamento nas duas garras menores. No geral, a rigidez foi a mesma nas deformações iniciais. Apenas o PET340 revelou diferença acentuada.

**Figura 5.22. Média dos ensaios de puncionamento do PET340**

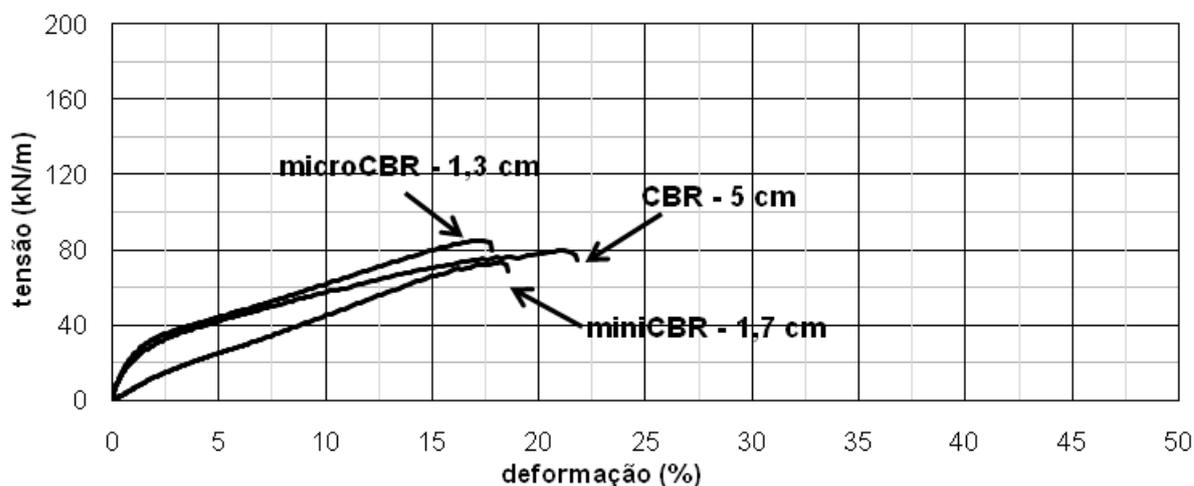


Figura 5.23. Média dos ensaios de puncionamento do PP500

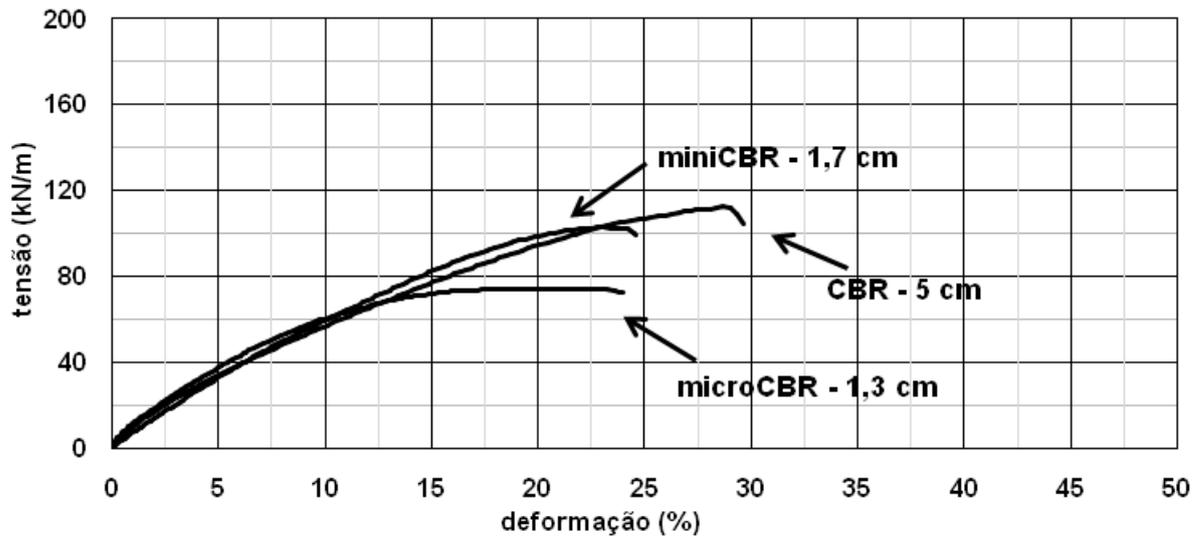


Figura 5.24. Média dos ensaios de puncionamento do PET740

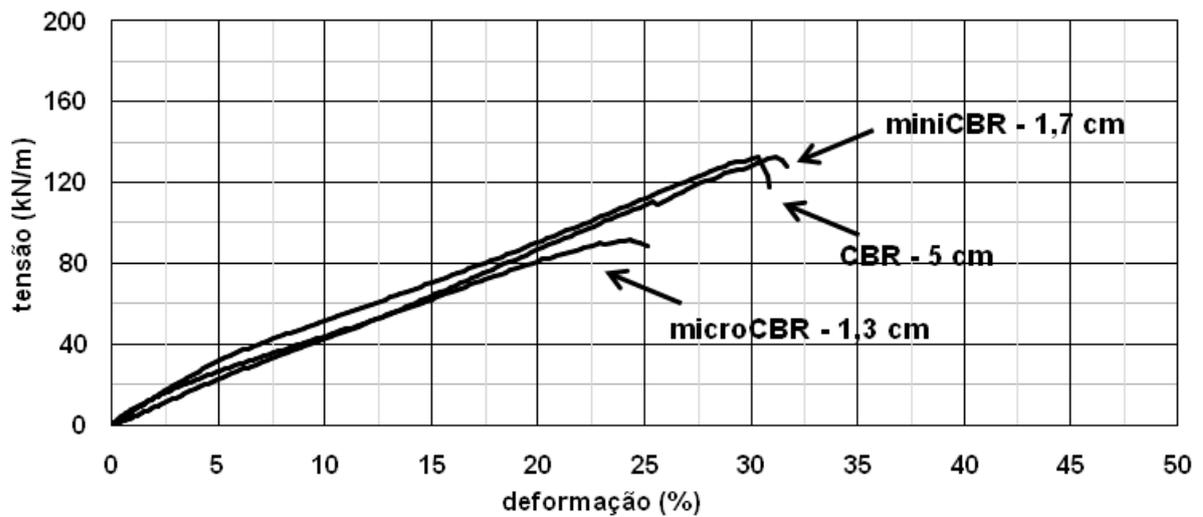
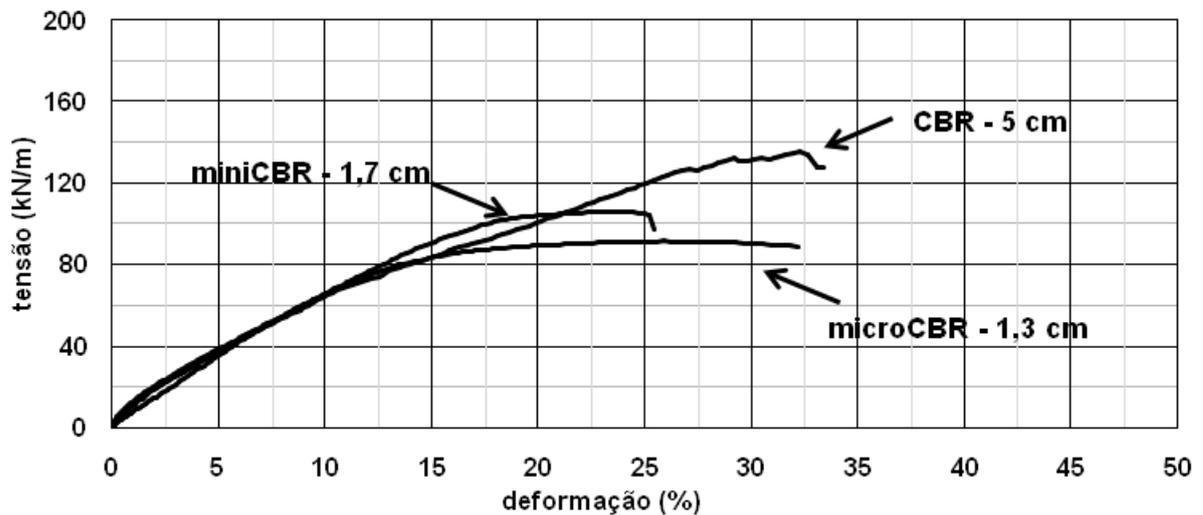


Figura 5.25. Média dos ensaios de puncionamento do PP925

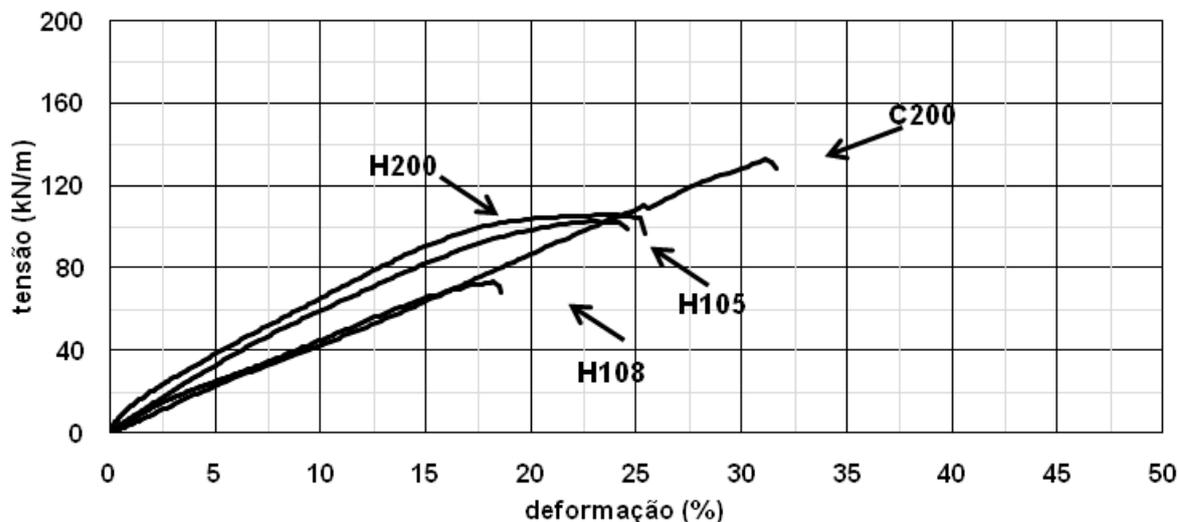


**Tabela 5.5: Resultados dos ensaios de tração indireta por puncionamento**

Amostra	Diâmetro CBR (cm)	T <sub>máx</sub> (kN/m)	Desvio (kN/m)	CV (%)	ε <sub>máx</sub> (%)	Desvio (%)	CV (%)
PET340	5	85,42	5,61	6,57	17,13	2,88	16,81
	1,7	73,88	3,52	4,76	18,02	0,78	4,35
	1,3	79,78	7,07	8,87	21,26	2,51	11,81
PP500	5	112,64	15,00	13,32	28,89	0,56	1,95
	1,7	103,33	7,06	6,83	23,04	1,00	4,33
	1,3	74,89	3,11	4,16	19,76	3,40	17,22
PET740	5	132,84	4,32	3,25	30,30	2,00	6,60
	1,7	132,86	4,55	3,43	31,11	1,85	5,94
	1,3	91,52	3,74	4,08	24,07	1,03	4,27
PP925	5	137,85	7,47	5,42	30,87	1,49	4,82
	1,7	106,24	4,58	4,31	22,87	1,52	6,63
	1,3	91,60	13,74	15,00	25,05	2,83	11,30

### Tração Indireta

A Figura 5.26 apresenta os resultados dos geotêxteis que foram ensaiados em escala reduzida, com pistão e garra 3 vezes inferior ao normatizado. A Tabela 5.6 exhibe a comparação dos ensaios de tração direta com geotêxteis de 50 mm de largura e indireta com o mini CBR de pistão medindo 17 mm de diâmetro. Os resultados em nível de tensão mostraram-se próximos para os geotêxteis PP500 e PET740, já as deformações foram menores. O PET340 obteve tensão 30% maior e deformação 10% menor e, o geotêxtil PP925, obteve tensão e deformação menores em 25% e 13%, aproximadamente. De maneira geral, foi observado que o escorregamento pode ter sido menor devido ao aperto ser mais próximo à amostra.

**Figura 5.26. Média dos ensaios de puncionamento**

**Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de tração direta TD e tração indireta TI**

Amostra	Ensaio	T <sub>máx</sub> (kN/m)	Desvio (kN/m)	CV (%)	ε <sub>máx</sub> (%)	Desvio (%)	CV (%)
PET340	TD	52,48	1,62	3,09	16,55	1,75	10,56
	TI	73,88	3,52	4,76	18,02	0,78	4,35
PP500	TD	106,15	2,05	1,94	32,11	1,3	4,04
	TI	103,33	7,06	6,83	23,04	1,00	4,33
PET740	TD	150,74	5,23	3,47	34,85	1,82	5,22
	TI	132,86	4,55	3,43	31,11	1,85	5,94
PP925	TD	147,16	2,17	1,47	28,53	0,83	2,92
	TI	106,24	4,58	4,31	22,87	1,52	6,63

### *Fluência*

Os ensaios de fluência foram realizados considerando as condições e as similaridades dos ensaios de tração convencional e de puncionamento estático, que apresentaram deformações altas com o escorregamento do corpo de prova nas garras. Para eventuais efeitos de comparação, a avaliação por valores normalizados pode conduzir a dados mais próximos à realidade de cada material ensaiado em outras garras, por exemplo. As avaliações, então, foram realizadas em corpos de prova com largura de 5 cm e entre garras de 2,5 cm, o qual apresentou estricção inferior a 10%. Com corpos de provas de faixa larga, não foi possível obter o parâmetro de resistência final em nenhum geotêxtil. Considerou-se que o valor encontrado no material PP500, comparado com o fabricante, foi um indicativo razoável para continuar com os testes.

### *Validação em Tempos Menores*

Para analisar as deformações por fluência, são coletados dados em 42 dias de ensaios. Foi observado que, as curvas formadas em cada um dos níveis de carregamento, correspondendo 10, 20, 30 e 40% da carga de ruptura do ensaio de tração direta, tendem a ser paralelas. Verificou-se, então, que o modelo de equação de fluência poderia ser válido em tempos menores que 42 dias de carregamento constante. Sendo assim, foram calculados os parâmetros da curva em cada conjunto de dados em determinado período de tempo e utilizados os dados da fluência em 12 e 24 horas antes do procedimento de aceleração. A Tabela 5.7 apresenta os dados em cada geotêxtil e a estatística dos valores.

**Tabela 5.7: Estatística dos coeficientes dos ensaios de fluência convencional**

dias	c	d	e
1	0,150	0,375	0,191
3	0,143	0,375	0,210
7	0,139	0,375	0,221
14	0,136	0,375	0,226
21	0,135	0,375	0,233
42	0,147	0,376	0,203
0,5	0,145	0,377	0,227
1	0,134	0,378	0,231
M	0,140	0,376	0,219
D	0,005	0,001	0,014
CV	3,9%	0,3%	6,4%

(a) PET340

dias	c	d	e
1	0,089	0,240	0,456
3	0,086	0,240	0,465
7	0,088	0,240	0,454
14	0,089	0,240	0,452
21	0,089	0,240	0,452
42	0,087	0,240	0,461
0,5	0,087	0,245	0,461
1	0,088	0,246	0,461
M	0,088	0,241	0,457
D	0,001	0,002	0,005
CV	1,7%	0,9%	1,2%

(b) PP500

dias	c	d	e
1	0,007	0,389	0,974
3	0,006	0,389	0,988
7	0,006	0,389	0,987
14	0,006	0,389	0,996
21	0,006	0,389	0,991
42	0,006	0,390	0,991
0,5	0,012	0,383	0,871
1	0,014	0,391	0,859
M	0,014	0,382	0,826
D	0,001	0,003	0,025
CV	4,5%	0,9%	3,0%

(c) PET740

dias	c	d	e
1	0,025	0,287	0,724
3	0,024	0,288	0,736
7	0,022	0,288	0,757
14	0,024	0,288	0,740
21	0,024	0,288	0,741
42	0,024	0,288	0,743
0,5	0,025	0,268	0,728
1	0,023	0,278	0,752
M	0,024	0,284	0,740
D	0,001	0,007	0,010
CV	3,2%	2,3%	1,4%

(d) PP925

M = média; D = desvio padrão; CV = coeficiente de variação  
c, d = coeficientes de inclinação e interceptação do comportamento exponencial de  $\varepsilon_\theta$  da Eq. 20  
e = coeficientes de inclinação do comportamento linear de  $\varepsilon_i$  da Eq. 20

Baseado nos coeficientes dos gráficos de fluência, em cada um dos 8 conjuntos de dados, é possível construir os gráficos da Figura 5.27. Na imagem, é ilustrada a pouca variação entre as tendências geradas pelos coeficientes quando comparadas aos dados experimentais. O exemplo faz parte do banco de dados do geotêxtil PP500. Para analisar as deformações por fluência no punctionamento, utilizou-se o mesmo procedimento que o ensaio tradicional descrito na metodologia. A Figura 5.28 e Tabela 5.8 exibem os gráficos e a estatística dos valores encontrados. Os resultados apresentam baixa variabilidade e os gráficos para comparação entre as tendências e dados experimentais são de coeficientes de correlação inferiores a 10%.

Figura 5.27. Dados experimentais e modelos do geotêxtil PP500 em fluência convencional

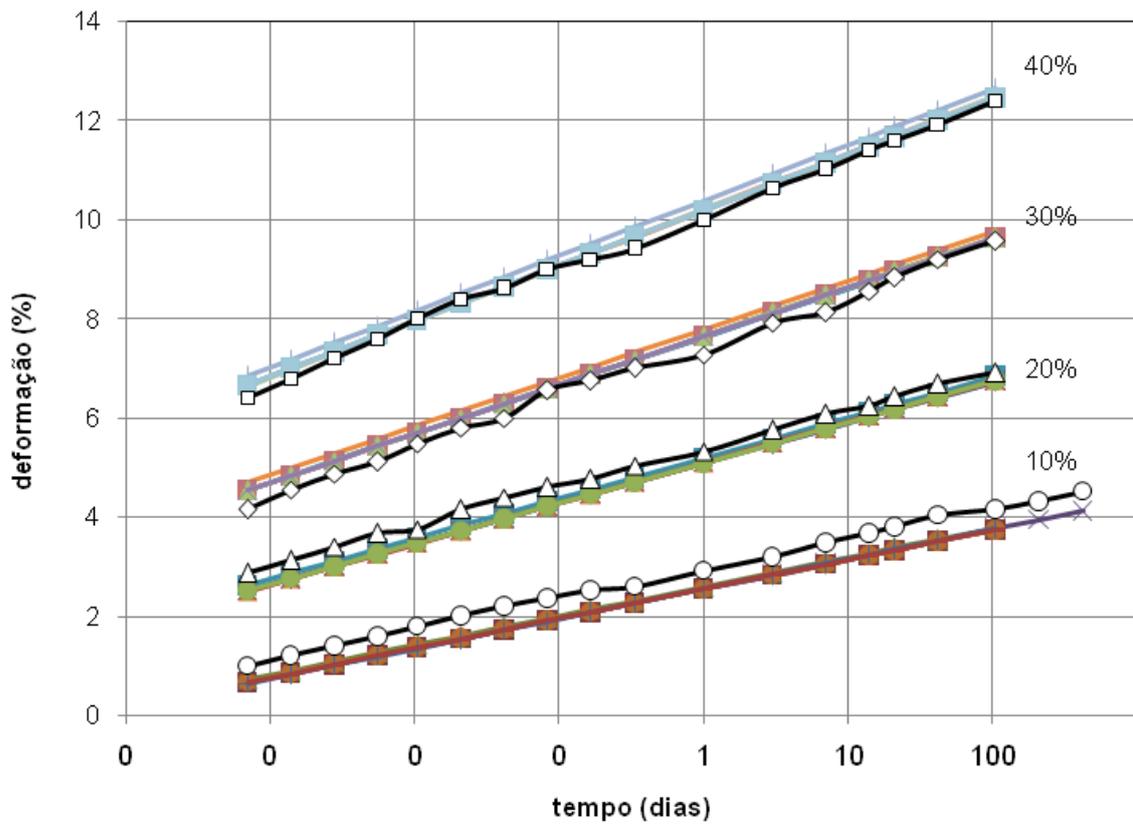
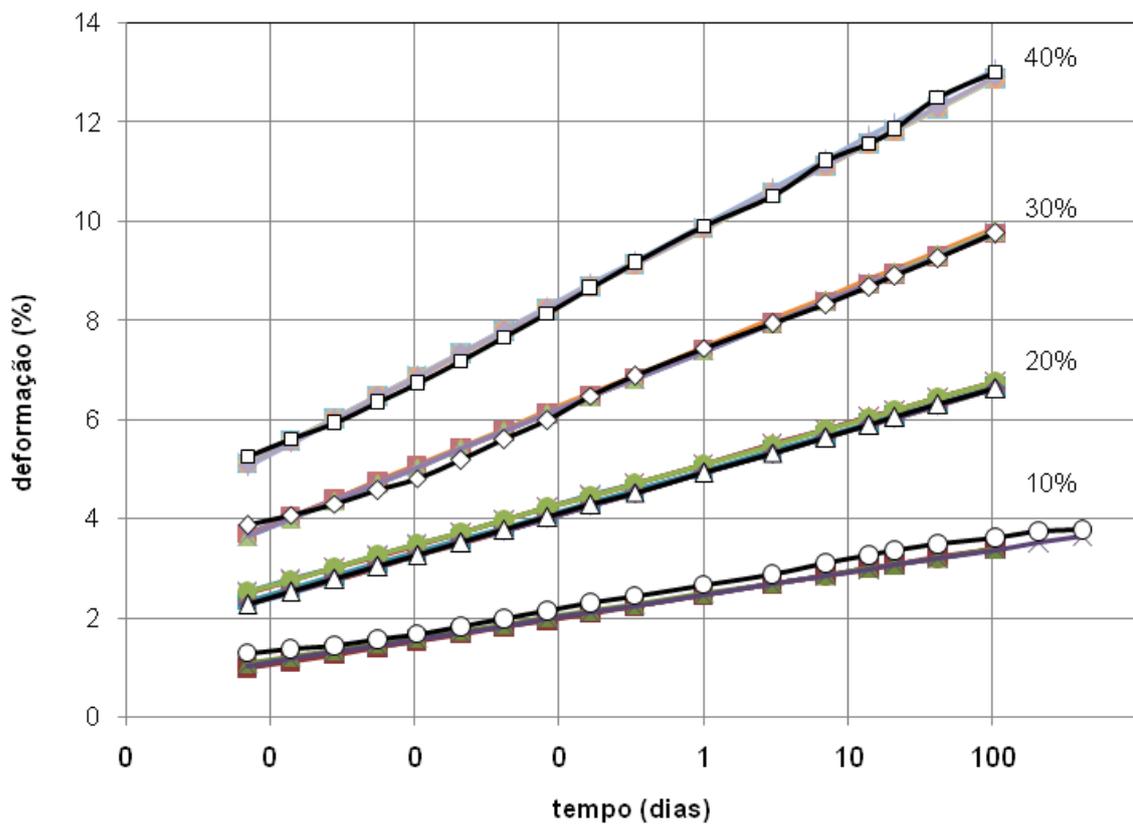


Figura 5.28. Dados experimentais e modelos do geotêxtil PP500 em fluência no punção



**Tabela 5.8: Estatística dos coeficientes dos ensaios de fluência por punção**

dias	c	d	e
1	0,057	0,284	0,626
3	0,051	0,285	0,664
7	0,051	0,285	0,666
14	0,050	0,285	0,672
21	0,052	0,286	0,664
42	0,053	0,286	0,658
0,5	0,058	0,288	0,626
1	0,053	0,284	0,659
M	0,053	0,285	0,655
D	0,003	0,001	0,016
CV	4,8%	0,4%	2,4%

(a) PET340

dias	c	d	e
1	0,026	0,238	0,861
3	0,027	0,238	0,860
7	0,028	0,238	0,849
14	0,029	0,238	0,838
21	0,029	0,238	0,832
42	0,029	0,238	0,834
0,5	0,024	0,241	0,898
1	0,025	0,241	0,943
M	0,027	0,239	0,863
D	0,002	0,001	0,034
CV	6,9%	0,4%	3,9%

(b) PP500

dias	c	d	e
1	0,013	0,380	0,822
3	0,014	0,380	0,808
7	0,014	0,380	0,802
14	0,015	0,381	0,800
21	0,015	0,381	0,804
42	0,014	0,382	0,819
0,5	0,012	0,383	0,870
1	0,014	0,391	0,859
M	0,014	0,382	0,826
D	0,001	0,003	0,025
CV	4,5%	0,9%	3,0%

(c) PET740

dias	c	d	e
1	0,020	0,265	0,916
3	0,022	0,265	0,893
7	0,022	0,265	0,895
14	0,022	0,266	0,897
21	0,022	0,266	0,898
42	0,022	0,266	0,897
0,5	0,021	0,261	0,890
1	0,025	0,265	0,850
M	0,022	0,265	0,889
D	0,001	0,001	0,018
CV	6,3%	0,6%	2,0%

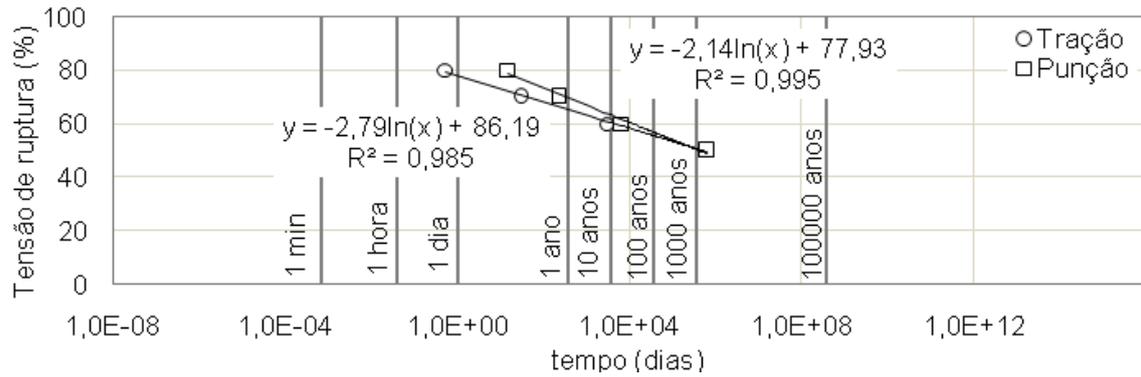
(d) PP925

M = média; D = desvio padrão; CV = coeficiente de variação  
c, d = coeficientes de inclinação e interceptação do comportamento exponencial de  $\varepsilon_\theta$  da Eq. 20  
e = coeficientes de inclinação do comportamento linear de  $\varepsilon_i$  da Eq. 20

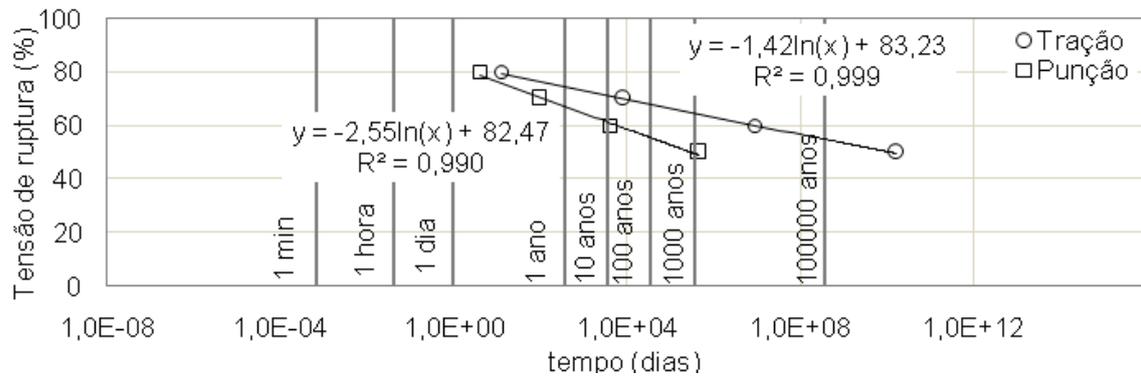
### *Modelo de Ruptura e Previsão da Durabilidade por Fluência*

A fim de determinar a durabilidade dos geossintéticos por este ensaio, sem as cargas determinadas por norma variando entre 50 a 90%, foram realizadas extrapolações dos dados através dos modelos gerados pelas Equações de fluência em cargas de 10, 20, 30 e 40% da carga de ruptura dos materiais estudados. Nos gráficos das Figura 5.29 a Figura 5.32, encontra-se a tendência gerada pelos dados de ruptura determinados pelas equações do modelo em cada geotêxtil.

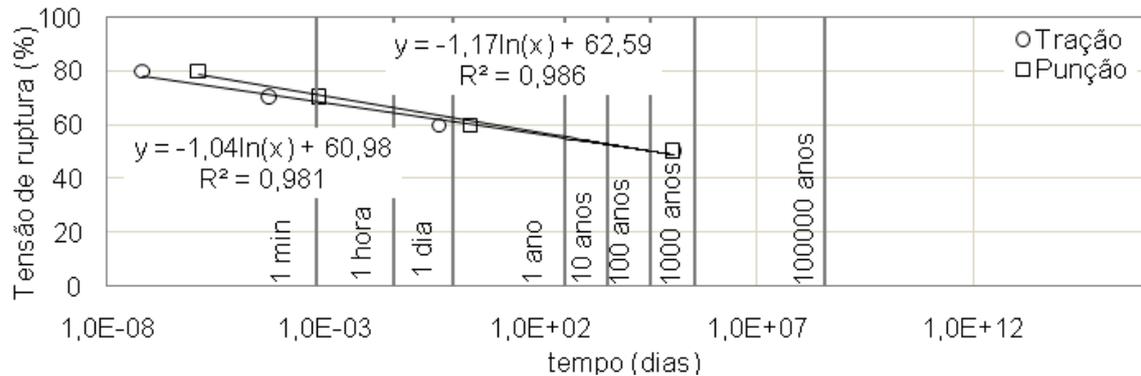
**Figura 5.29. Ruptura por fluência do PET340**



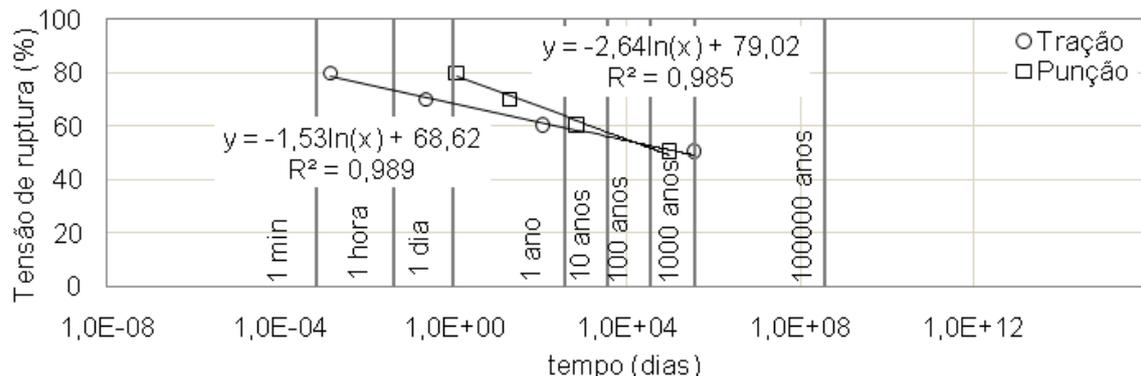
**Figura 5.30. Ruptura por fluência do PP500**



**Figura 5.31. Ruptura por fluência do PET740**



**Figura 5.32. Ruptura por fluência do PP925**



Como podem ser observadas, as curvas geraram diferenças significativas entre a fluência convencional comparada ao puncionamento. Com exceção do geotêxtil PET740, a fluência na tração resultou maior durabilidade comparado as análises do ensaio de fluência por puncionamento estático. Considerando 50% de carga de trabalho, o PP500 excede 1000 anos até alcançar a ruptura. Já o PET340 este valor é 897 anos considerando a fluência no puncionamento e mais de 1000 anos na tração. O geotêxtil PP925 apresentou valores de 502 anos na tração e 162 anos no puncionamento, e, o PET740, 97 e 119 anos respectivamente.

Nas Figura 5.33 à Figura 5.36, pode-se identificar, através das comparações entre os ensaios de tensão vs. deformação e resposta da fluência em cada nível de carga, o que gerou a grande diferença entre os dados obtidos. Cada figura contém os resultados, tanto no ensaio de tração direta, quanto no de tração indireta por puncionamento. As linhas de 1 minuto, 1 dia e 42 dias foram geradas pelo modelo da equação de fluência em cada nível de carga, o que permitiu uma melhor análise dos dados. Pôde-se observar o porquê de os modelos gerarem durabilidade tão alta nos geotêxteis PP500 e PET340. Os ensaios de tração e punção nestes materiais duraram menos de 1 minuto até a sua ruptura, porém as deformações de fluência não foram superiores em nenhum dos níveis de carga e, conseqüentemente, nas extrapolações. O escorregamento, no ensaio dinâmico, diferentemente do que foi observado nos ensaios de fluência, pode ser a resposta para a diferença na comparação dos resultados de deformação apresentados.

**Figura 5.33. Comparação entre os ensaios mecânicos do PET340**

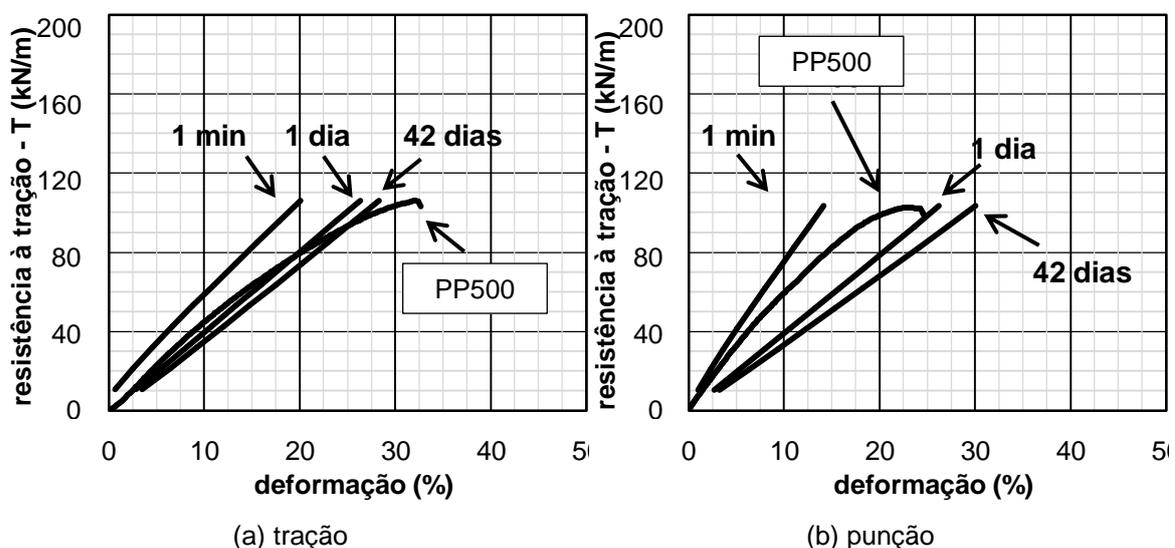


Figura 5.34. Comparação entre os ensaios mecânicos do PP500

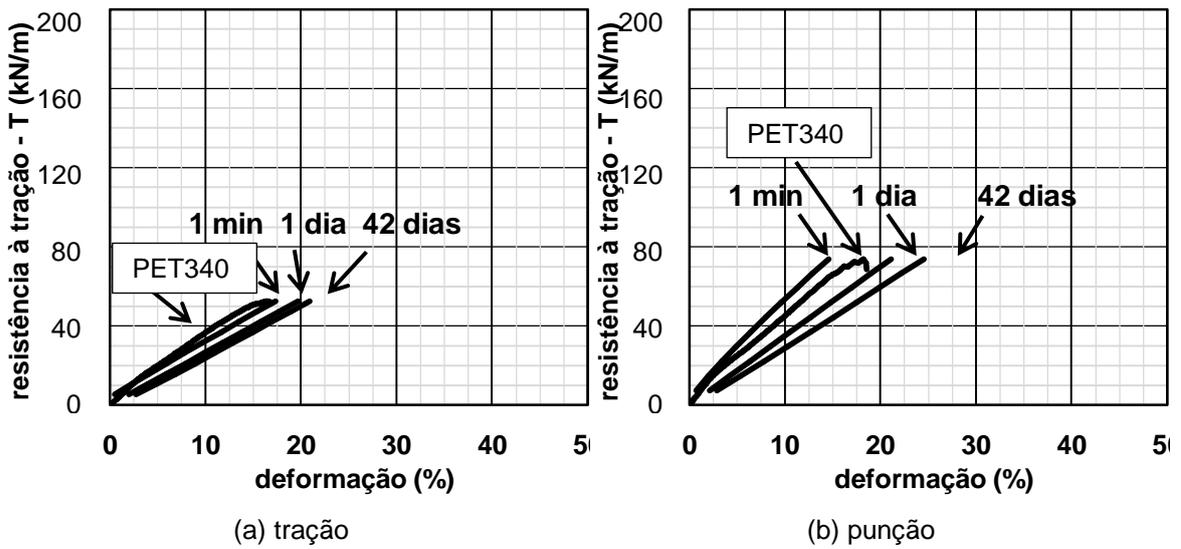


Figura 5.35. Comparação entre os ensaios mecânicos do PET740

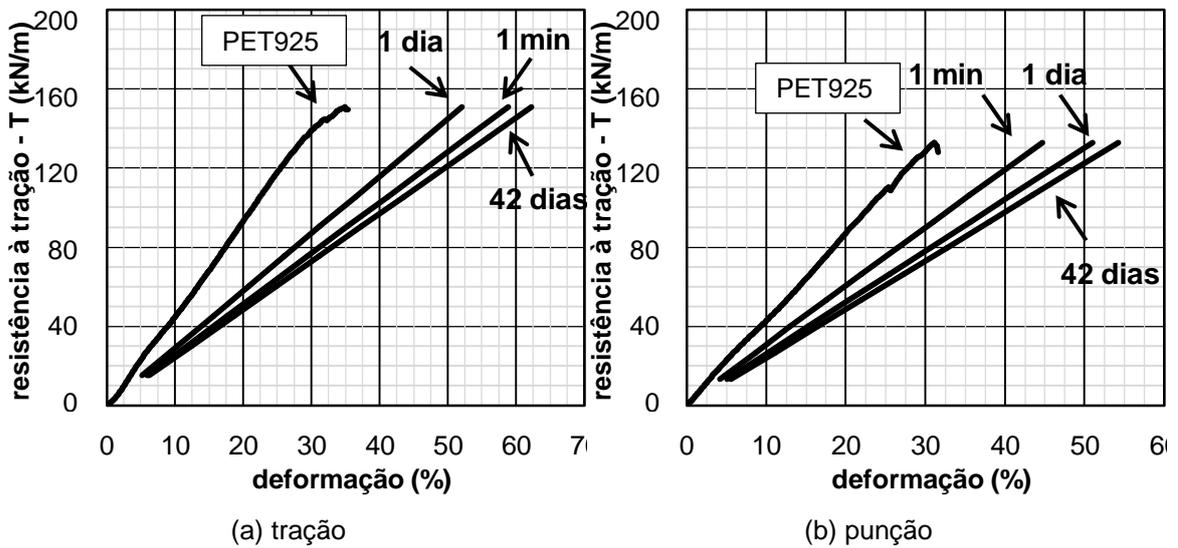
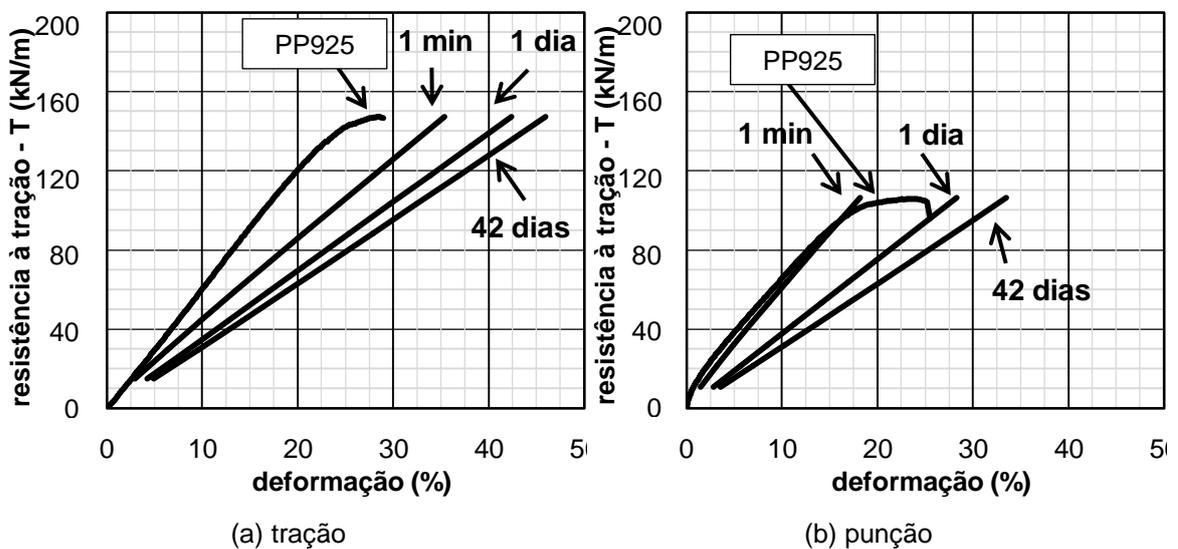


Figura 5.36. Comparação entre os ensaios mecânicos do PP925



É de se esperar que a linha que corresponde às tensões e deformações em 1 minuto de leitura dos dados de fluência seja maior que o comportamento do ensaio de tração direta ou indireta. Uma observação prática seria aplicar 100% da carga de ruptura em um ensaio de fluência. O material irá romper dentro do tempo de 1 minuto de carregamento. A ideia é mais bem observada nos ensaios do PET740 e PP925. Os modelos das curvas de fluência geraram dados de deformações maiores e melhores tendências, às quais permitiram uma análise de durabilidade dentro dos tempos de vida útil encontrados na literatura.

### *Fluência Acelerada*

Os ensaios de fluência acelerados foram realizados no equipamento de saturação e secagem. Os dados foram interpretados e permitiram novos modelos de ruptura por fluência considerando a degradação simultânea. Com as análises dos ensaios e gráficos, é possível criar os modelos de degradação acelerada. Os ensaios que começaram a partir de 12 e 24 horas foram trabalhados e, identificados os coeficientes das curvas de fluência, apresentados pela Tabela 5.9 e Tabela 5.10.

**Tabela 5.9: Coeficientes dos ensaios de fluência acelerada em garras de tração**

dias	c	d	e	dias	c	d	e
0,5	1,480	0,192	0,376	0,5	0,584	0,416	0,240
1	1,535	0,177	0,376	1	0,588	0,403	0,240
M	1,508	0,185	0,376	M	0,586	0,410	0,240
D	0,039	0,011	0,000	D	0,003	0,009	0,000
CV	2,6%	5,7%	0,0%	CV	0,5%	2,2%	0,0%
(a) PET340				(b) PP500			
dias	c	d	e	dias	c	d	e
0,5	0,664	0,407	0,390	0,5	0,759	0,348	0,288
1	0,675	0,404	0,390	1	0,663	0,359	0,288
M	0,670	0,406	0,390	M	0,711	0,354	0,288
D	0,008	0,002	0,000	D	0,068	0,008	0,000
CV	1,2%	0,5%	0,0%	CV	9,5%	2,2%	0,0%
(c) PET740				(d) PP925			

M = média; D = desvio padrão; CV = coeficiente de variação  
c, d = coeficientes de inclinação e interceptação do comportamento exponencial de  $\varepsilon_{\theta}$  da Eq. 20  
e = coeficientes de inclinação do comportamento linear de  $\varepsilon_i$  da Eq. 20

**Tabela 5.10: Coeficientes dos ensaios de fluência acelerada em garras de punção**

dias	c	d	e
0,5	0,699	0,606	0,286
1	0,632	0,621	0,286
M	0,666	0,614	0,286
D	0,047	0,011	0,000
CV	7,1%	1,7%	0,0%

(a) PET340

dias	c	d	e
0,5	0,446	0,510	0,239
1	0,440	0,514	0,239
M	0,443	0,512	0,239
D	0,004	0,003	0,000
CV	1,0%	0,6%	0,0%

(b) PP500

dias	c	d	e
0,5	0,636	0,323	0,384
1	0,560	0,353	0,384
M	0,598	0,338	0,384
D	0,053	0,021	0,000
CV	9%	6%	0%

(c) PET740

dias	c	d	e
0,5	0,665	0,512	0,266
1	0,566	0,500	0,266
M	0,616	0,506	0,266
D	0,070	0,009	0,000
CV	11,4%	1,7%	0,0%

(d) PP925

M = média; D = desvio padrão; CV = coeficiente de variação  
 c, d = coeficientes de inclinação e interceptação do comportamento exponencial de  $\varepsilon_\theta$  da Eq. 20  
 e = coeficientes de inclinação do comportamento linear de  $\varepsilon_i$  da Eq. 20

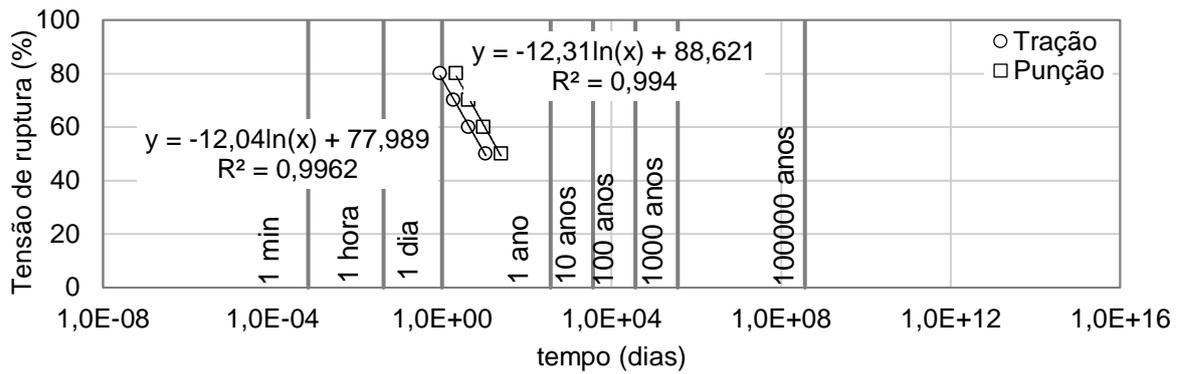
Neste sentido, há uma adaptação da Equação 20 apresentada nos ensaios de caracterização por fluência para gerar os modelos de curva acelerada. A diferença na Equação é o coeficiente  $C$ , que é a soma entre os coeficientes  $c$  do ensaio de fluência convencional mais o do ensaio acelerado.

$$\varepsilon = C.T^d \cdot \ln(t) + e.T \quad [26]$$

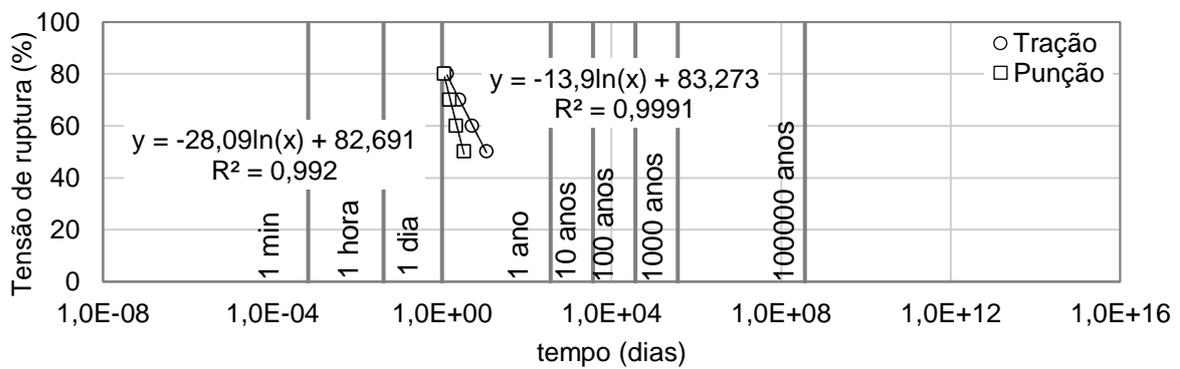
#### *Modelo de Ruptura e Previsão da Durabilidade por Fluência*

A fim de determinar a durabilidade dos geossintéticos por este ensaio, sem as cargas determinadas por norma variando entre 50 a 90%, foram realizadas extrapolações dos dados através dos modelos gerados pelas Equações de fluência em cargas de 10, 20, 30 e 40% da carga de ruptura dos materiais estudados. Nos gráficos das Figura 5.37 à Figura 5.40, encontra-se a tendência gerada pelos dados de ruptura determinados pelas equações do modelo em cada geotêxtil.

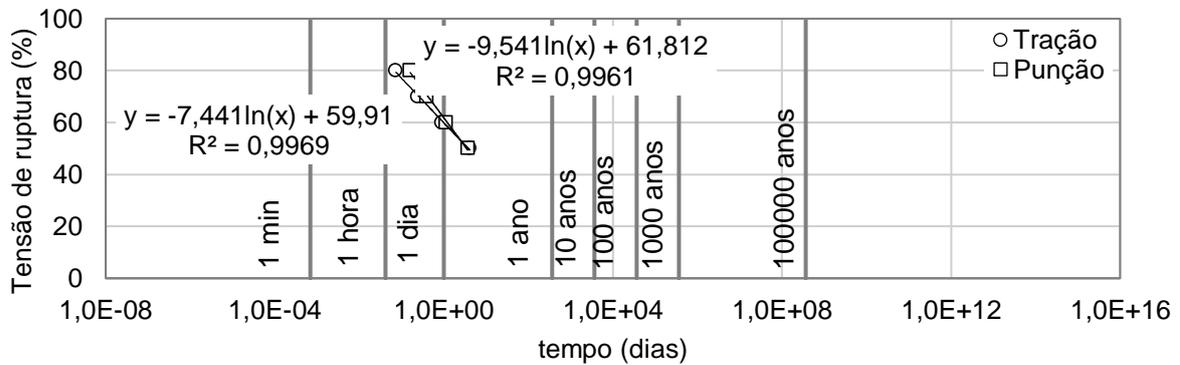
**Figura 5.37. Ruptura por fluência no geotêxtil PET340**



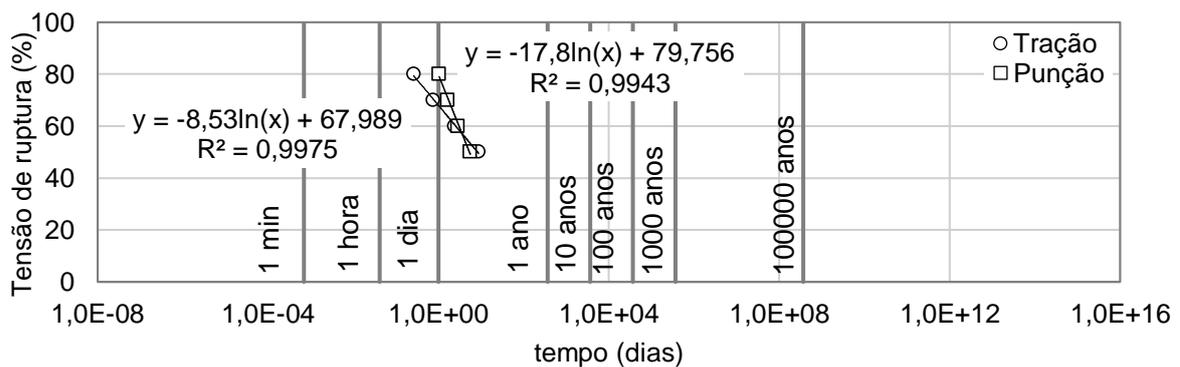
**Figura 5.38. Ruptura por fluência no geotêxtil PP500**



**Figura 5.39. Ruptura por fluência no geotêxtil PET740**



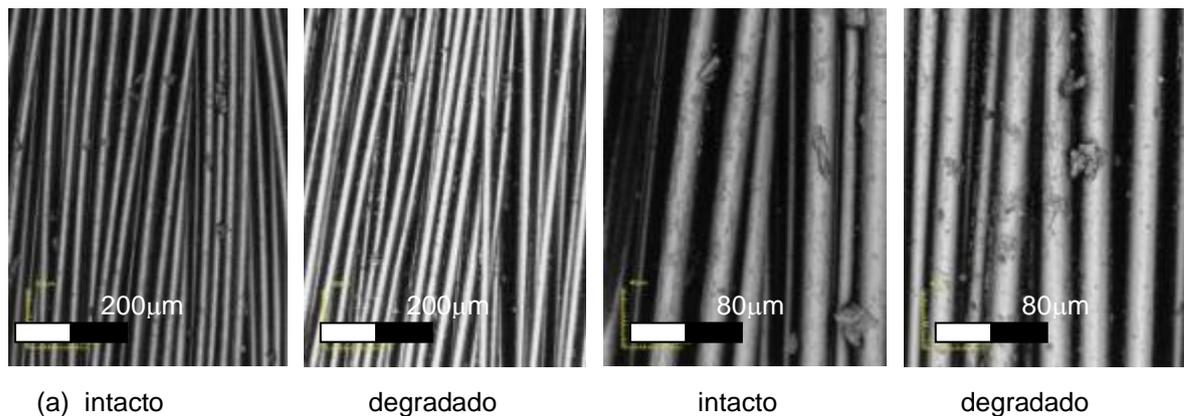
**Figura 5.40. Ruptura por fluência no geotêxtil PP925**



As curvas geraram extrapolações, de previsão da ruptura por fluência acelerada, com os resultados inferiores a um ano de utilização, considerando material sob 50% de carga de trabalho. Nos resultados de Salles (2006) foram observados que para a quantidade de ciclos utilizados na aceleração, até 50 ciclos, as tensões e deformações dos geotêxteis de polipropilenos daquela pesquisa houve diminuição destes parâmetros em até 25 e 30% respectivamente. A rigidez secante a 50%, por sua vez, ficou até 45% menor. Isso justifica a o aumento acentuado das deformações sob a carga constante durante a ciclagem.

Nas imagens das Figura 5.41 a Figura 5.44, é possível ver as micrografias do material antes e depois do ensaio de fluência acelerada. Os geotêxteis tiveram sua textura alterada ao longo dos 36 ciclos de degradação por saturação e secagem. As superfícies dos multifilamentos apresentaram maior densidade em relação à rugosidade superficial, bem como os laminetes, que revelaram também microfissuras e diminuição da quantidade de fibras soltas durante o ensaio.

**Figura 5.41. PET340 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes**



**Figura 5.42. PP500 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes**

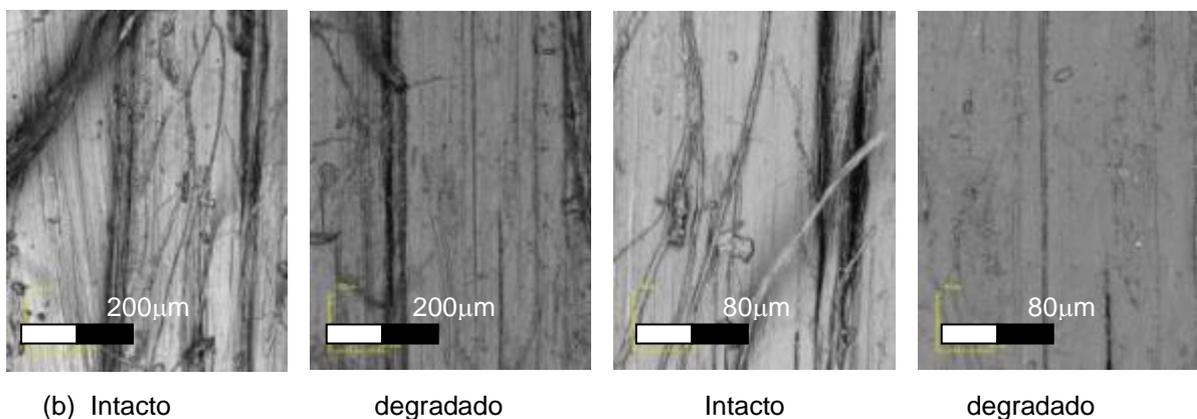


Figura 5.43. PET340 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes

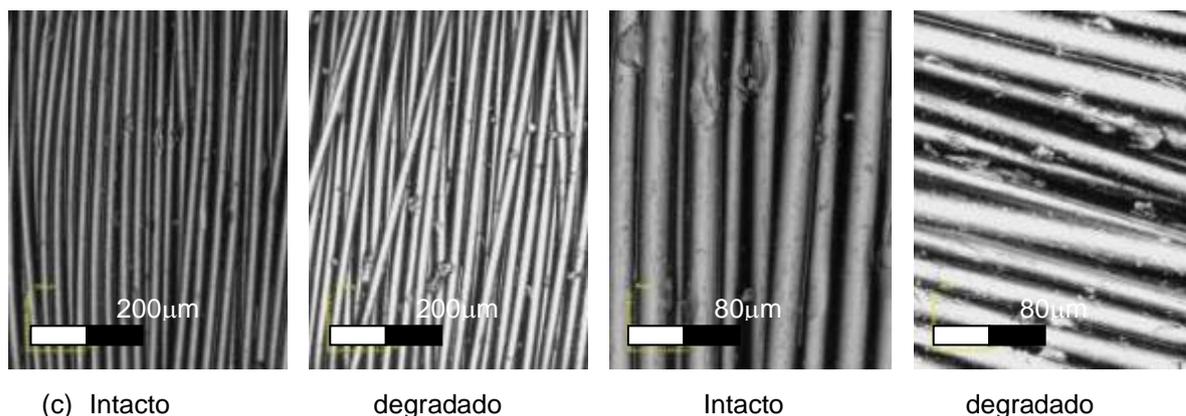
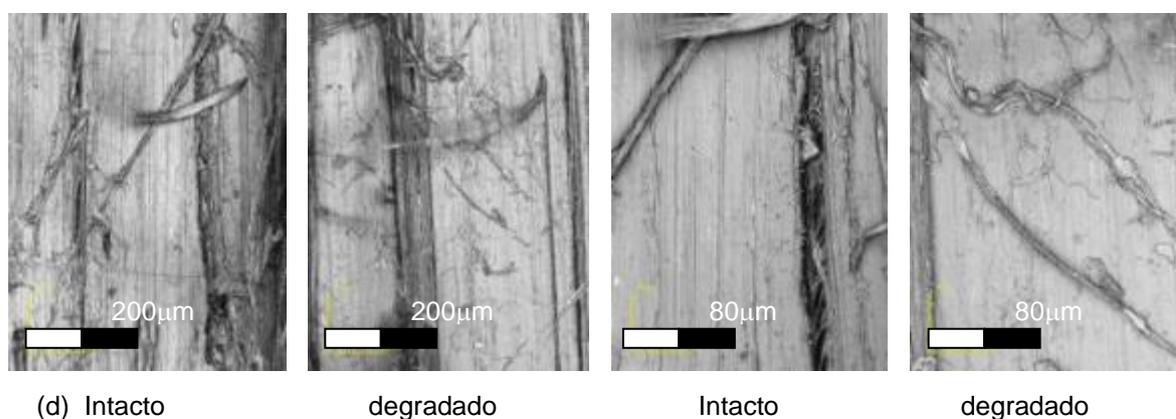


Figura 5.44. PET340 intacto e degradado em aproximações de 20 e 50 vezes



## Propriedades Hidráulicas

### Permissividade

As Tabelas 5.11 e 5.12 expõem dados relativos ao ensaio de permeabilidade após degradação no natural no campo e com procedimentos acelerados em laboratório. São apresentados, também, a permissividade dos materiais.

Tabela 5.11: Permissividade e permeabilidade dos geotêxteis após degradação no campo

Propriedade	Material											
	PET340			PP500			PET740			PP925		
	intacto	1 ano	2 anos									
$k_n$ (m/s)	0,021 ±0,001	0,026 ±0,002	0,016 ±0,002	0,008 ±0,000	0,014 ±0,001	0,027 ±0,002	0,003 ±0,001	0,003 ±0,000	0,001 ±0,000	0,007 ±0,002	0,026 ±0,002	0,014 ±0,001
$\psi$ (s <sup>-1</sup> )	0,042 ±0,002	0,052 ±0,004	0,031 ±0,003	0,005 ±0,000	0,009 ±0,001	0,018 ±0,001	0,002 ±0,001	0,002 ±0,000	0,001 ±0,000	0,003 ±0,001	0,010 ±0,001	0,005 ±0,000

**Tabela 5.12: Permissividade e permeabilidade dos geotêxteis após degradação no laboratório**

Propriedade	Material											
	PET340			PP500			PET740			PP925		
	intacto	2184 horas	4800 horas									
$k_n$ (m/s)	0,021 ±0,001	0,077 ±0,002	0,077 ±0,002	0,008 ±0,000	0,008 ±0,001	0,009 ±0,002	0,003 ±0,001	0,024 ±0,000	0,007 ±0,000	0,007 ±0,002	0,009 ±0,002	0,011 ±0,001
$\psi$ (s <sup>-1</sup> )	0,042 ±0,002	0,152 ±0,014	0,153 ±0,016	0,005 ±0,000	0,005 ±0,001	0,006 ±0,001	0,002 ±0,001	0,021 ±0,000	0,006 ±0,000	0,003 ±0,001	0,003 ±0,001	0,004 ±0,000

### *Abertura de Filtração*

Esta propriedade, denominada  $O_{90}$ , equivale a 90% do solo graduado passante pelos geotêxteis durante o ensaio. É obtida graficamente pelo resultado do ensaio de granulometria. A Tabela 5.13 resume os valores encontrados. As propriedades físicas interferem diretamente nestes resultados. Em relação à espessura, gramatura e porosidade, a abertura de filtração é inversamente proporcional.

**Tabela 5.13: Resultados de abertura de filtração dos geotêxteis após degradação**

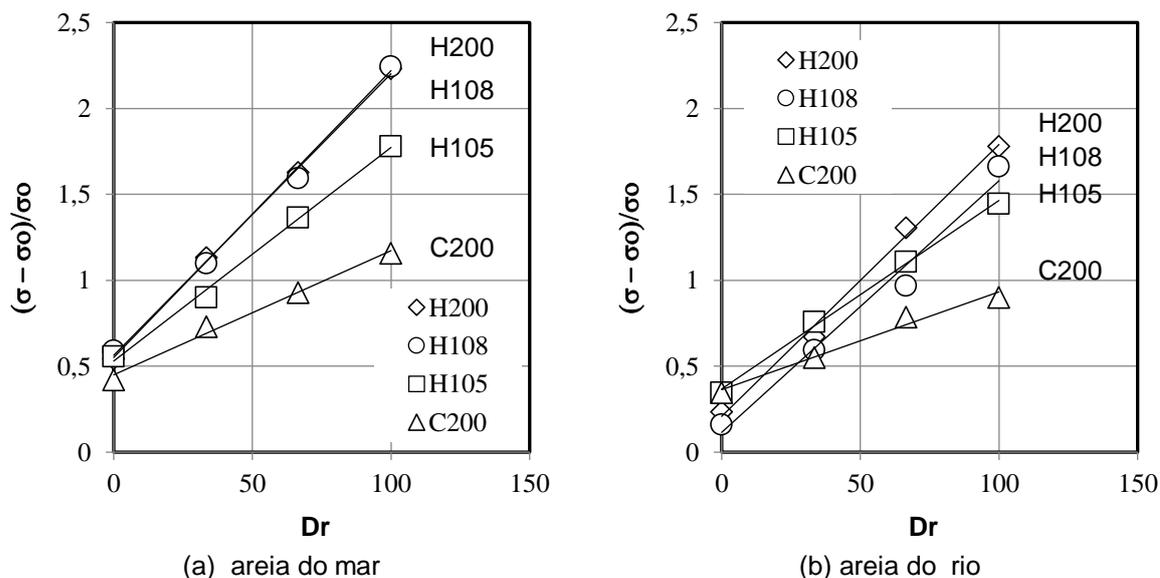
Propriedade	Material							
	PET340		PP500		PET740		PP925	
	intacto	2 anos						
$O_{90}$ (mm)	0,21 ±0,02	0,32 ±0,01	0,18 ±0,01	0,23 ±0,02	0,06 ±0,01	0,03 ±0,00	0,12 ±0,02	0,40 ±0,02

### **Propriedades de Desempenho**

#### *Punção Confinada*

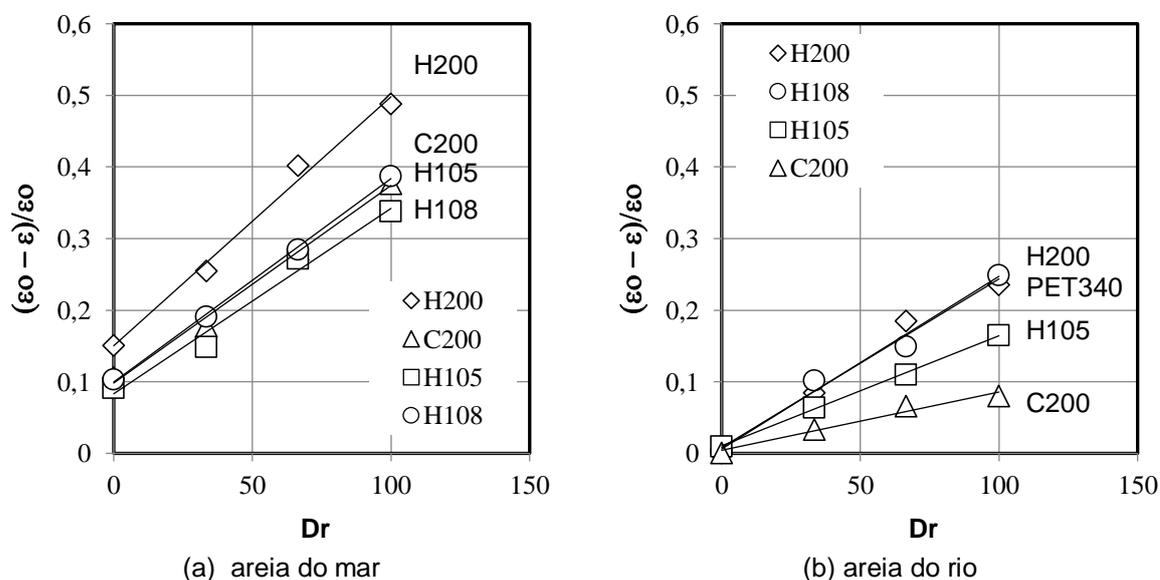
As Figuras 5.45 e 5.46 mostram o comportamento de tensões e deformações normalizadas pelas densidades relativas das areias utilizadas no projeto. Foi observado que a tensão aumenta com o confinamento, enquanto que a deformação é reduzida, mostrando uma relação inversamente proporcional e linear. A deformação não foi alterada (Figura 5.45b), mostrando a ocorrência de vazios suficientes para causar a ruptura geotêxtil com o mesmo deslocamento na condição não-confinada.

**Figura 5.45. Desenvolvimento da tensão em relação à densidade relativa das areias utilizadas no punção confinado**



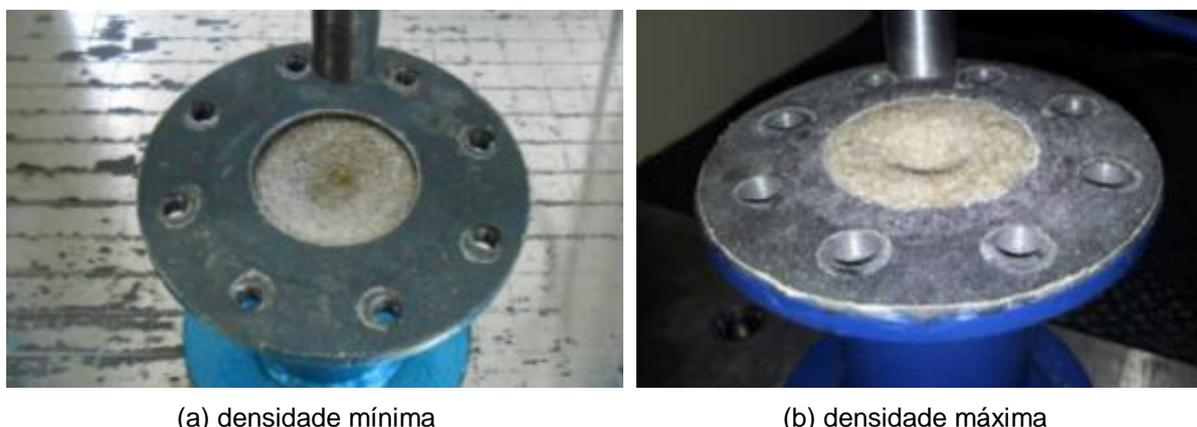
Pode-se observar que o solo aumenta significativamente a resposta final das tensões nos ensaios. A reação do solo aumenta a resistência do conjunto já que, sem confinamento, o geotêxtil já estaria rompido. O incremento de tensão na areia marinha resultou em mais de 200% na resistência final, já a areia de rio chegou perto de 180%. A diferença é justamente devido à granulometria da areia do rio permitir maiores vazios, o que não acontece com a areia marinha, com maior quantidade de finos que tornam conjunto mais compacto.

**Figura 5.46. Desenvolvimento da deformação em relação à densidade relativa das areias utilizadas no punção confinado**



Como foi descrito, o comportamento das areias provoca aumento da resistência do conjunto e, conseqüentemente, menores deformações do geotêxtil. A areia do mar apresentou melhor arranjo da sua granulometria com maior quantidade de finos e diminuem as respostas de deformações no ensaio com a densidade mínima. A areia do rio, por sua vez, com maiores vazios, não contribuiu com a diminuição das deformações. As deformações diminuíram na areia do mar em até 50% em cada material, ou seja, 2 vezes a resposta da areia do rio, com até 25%. A Figura 5.44 ilustra como a areia fica ao final dos ensaios com densidade mínima e máxima. É bem didática a forma do pistão na areia nas duas situações, onde se observam os vazios na Figura 5.44a e o resultado da dilatação na Figura 5.44b

**Figura 5.47. Areia marinha utilizada no punção confinada em densidades diferentes**



### *Radiação Ultravioleta*

A exposição acelerada possibilitou análises de tração direta e indireta. As Tabelas 5.14 e 5.15 apresentam os valores de perda de resistência para cada ciclo.

**Tabela 5.14: Resultados de tensão direta após degradação por UV**

ciclos	horas		Material							
			PET340		PP500		PET740		PP925	
	total	UV	Tensão	% perda	Tensão	% perda	Tensão	% perda	Tensão	% perda
50	400	200	20,50	60,93	95,71	9,84	82,78	45,08	132,07	10,26
100	800	400	14,62	72,14	88,85	16,29	58,36	61,28	126,17	14,26
130	1600	800	9,40	82,08	85,29	19,65	51,09	66,10	122,82	16,54
270	2640	1320	5,15	90,18	73,94	30,35	48,21	68,01	90,48	38,52
600	4800	2400	1,52	97,11	47,68	55,08	40,49	73,14	76,62	47,93

**Tabela 5.15: Resultados de tensão indireta após degradação por UV**

ciclos	horas		Material							
			PET340		PP500		PET740		PP925	
	total	UV	Tensão	% perda	Tensão	% perda	Tensão	% perda	Tensão	% perda
50	400	200	40,74	44,85	97,91	5,24	109,80	17,35	101,08	4,86
100	800	400	25,99	64,82	93,74	9,27	89,80	32,41	86,82	18,28
130	1600	800	19,45	73,67	87,45	15,36	82,65	37,79	81,20	23,57
270	2640	1320	12,90	82,54	85,68	17,08	74,98	43,56	74,62	29,76
600	4800	2400	5,15	93,03	62,51	39,51	64,16	51,71	64,04	39,72

A ordem de grandeza das respostas foi a mesma comparando os ensaios de tração e punção. Em geral, a perda de resistência foi maior nos ensaios de tração direta. Destaque para redução da resistência dos poliésteres PET340 e PET740, que passaram de 50%. O primeiro apresentou dificuldades para realização dos ensaios. Foi necessário cuidado no manuseio do corpo de prova, pois o material se encontrou bem degradado. Os materiais em polipropileno, PP500 e PP925, por sua vez, perderam até 55% de sua resistência com o material de menor gramatura.

Analisando as deformações, pode-se avaliar o quanto esta propriedade foi alterada com o a radiação ultravioleta. As Tabela 5.16 e Tabela 5.17 exibem estes valores em termos de variação de deformação para cada um dos ciclos finais, respectivamente, em análises de tração direta e indireta.

**Tabela 5.16: Resultados de deformação na tração direta após degradação por UV**

ciclos	horas		Material							
			PET340		PP500		PET740		PP925	
	total	UV	$\epsilon$ (%)	% variação						
50	400	200	7,21	56,42	30,48	5,07	20,35	34,56	30,77	-7,86
100	800	400	3,77	77,21	29,30	8,76	21,01	32,45	30,33	-6,30
130	1600	800	5,42	67,28	27,75	13,59	17,79	42,82	28,92	-1,35
270	2640	1320	3,65	77,96	26,73	16,75	17,74	42,96	30,57	-7,15
600	4800	2400	2,17	86,89	14,99	53,32	18,87	39,34	20,30	-27,13

**Tabela 5.17: Resultados de deformação na tração indireta após degradação por UV**

ciclos	horas		Material							
			PET340		PP500		PET740		PP925	
	total	UV	$\epsilon$ (%)	% variação						
50	400	200	9,66	46,41	20,53	10,86	26,02	16,35	25,35	-10,85
100	800	400	7,15	60,30	22,49	2,35	23,77	23,60	29,12	-27,33
130	1600	800	6,29	65,10	22,71	1,41	25,42	18,27	27,85	-21,77
270	2640	1320	7,91	56,08	20,76	9,86	20,53	33,99	31,12	-36,08
600	4800	2400	5,88	67,39	11,70	49,21	19,25	38,11	31,79	-39,00

As deformações dos geotêxteis PET340, PP500 e PET740 diminuiram, porém, em proporções menores que as tensões apresentadas. Isso sugere rigidez igual ou menor, de acordo com os valores encontrados em cada material. O PP925, por sua vez, aumentou as deformações com o tempo de degradação. Pelos gráficos das Figuras Figura 5.48 à Figura 5.55, é possível avaliar estes parâmetros.

Figura 5.48. Resultados de tração direta do PET340 após exposição em laboratório

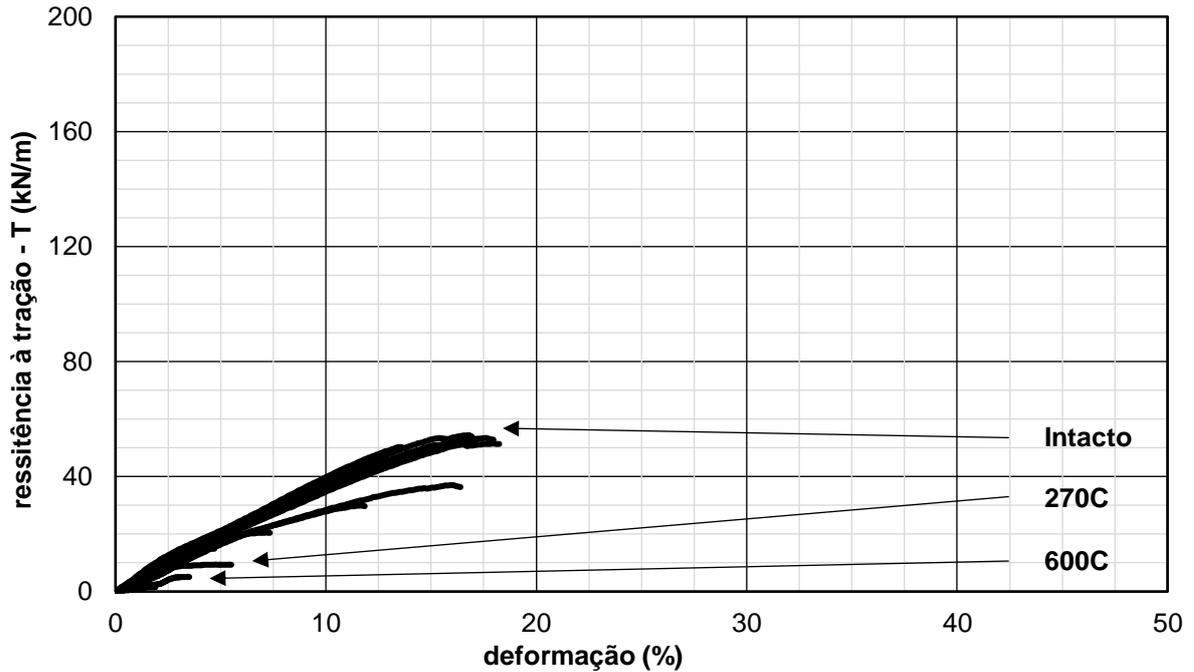


Figura 5.49. Resultados de tração indireta do PET340 após exposição em laboratório

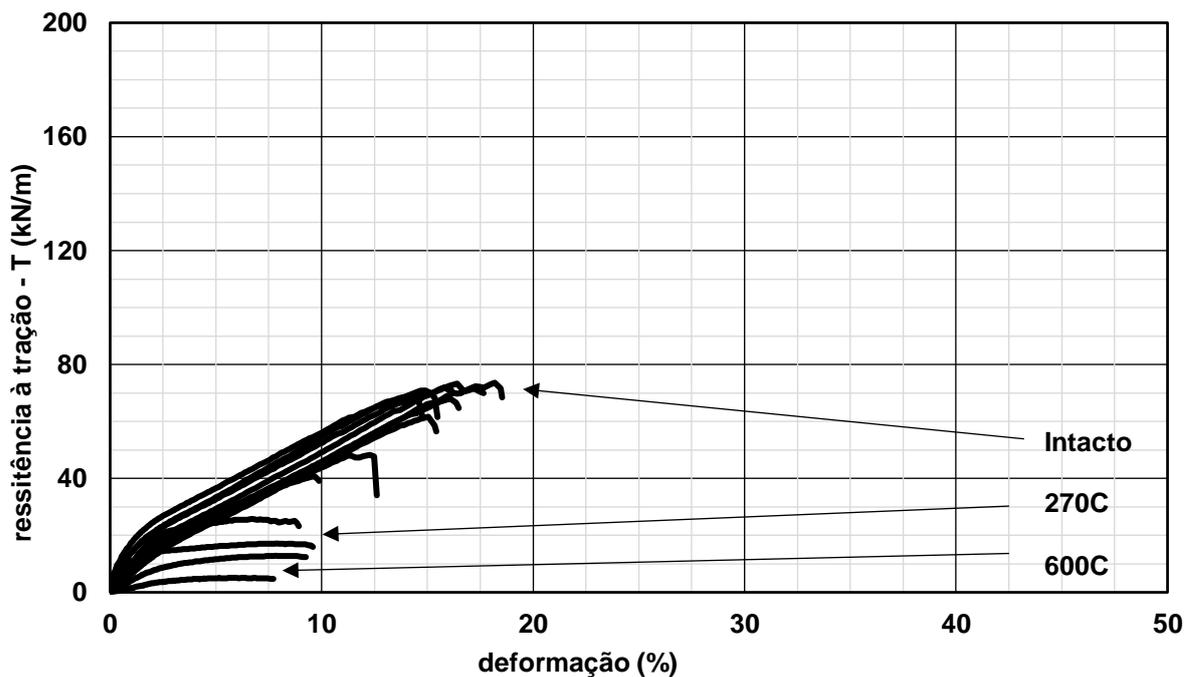


Figura 5.50. Resultados de tração direta do PP500 após exposição em laboratório

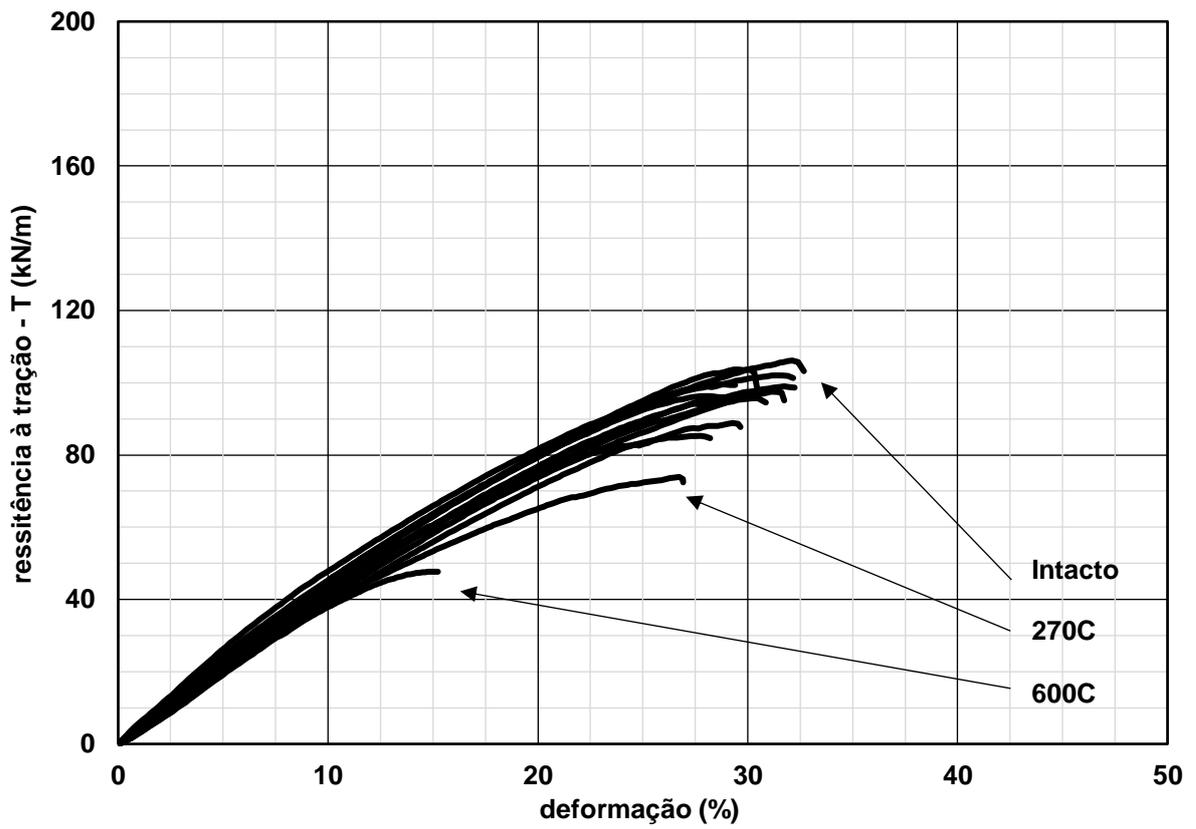


Figura 5.51. Resultados de tração indireta do PP500 após exposição em laboratório

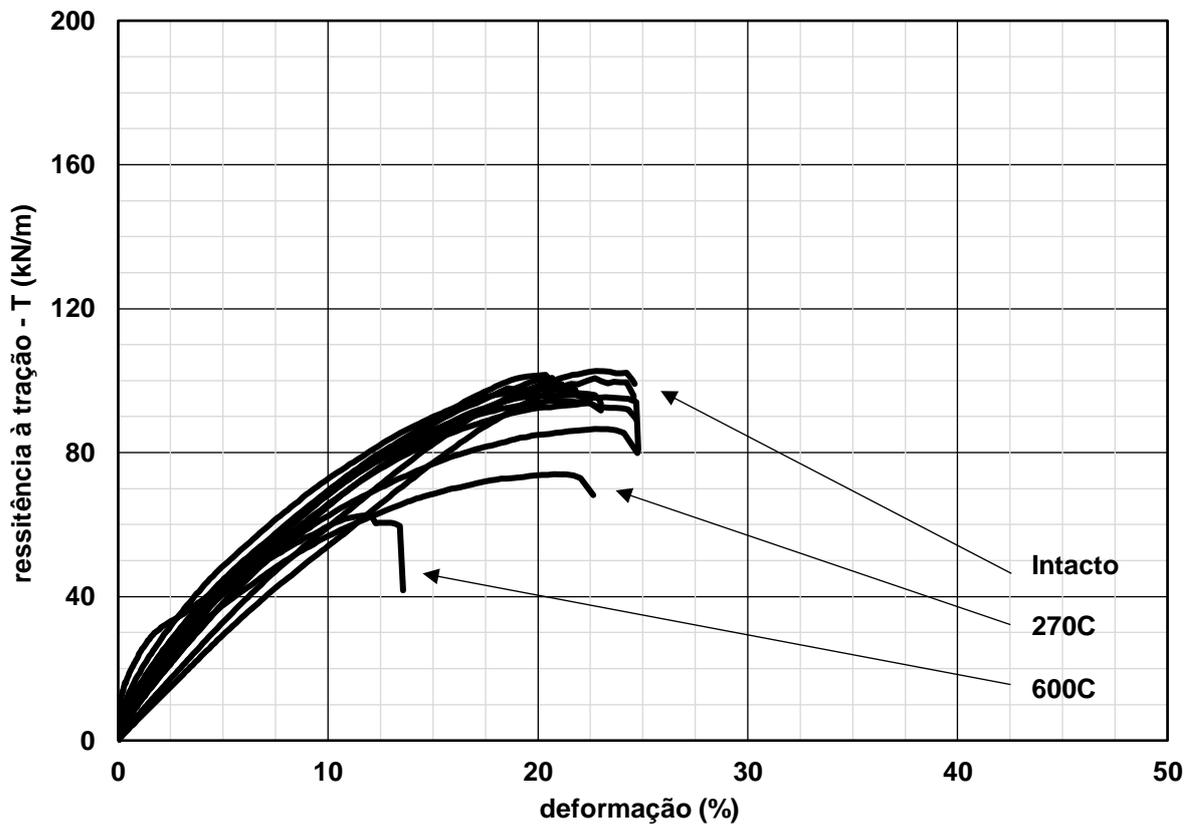


Figura 5.52. Resultados de tração direta do PET740 após exposição em laboratório

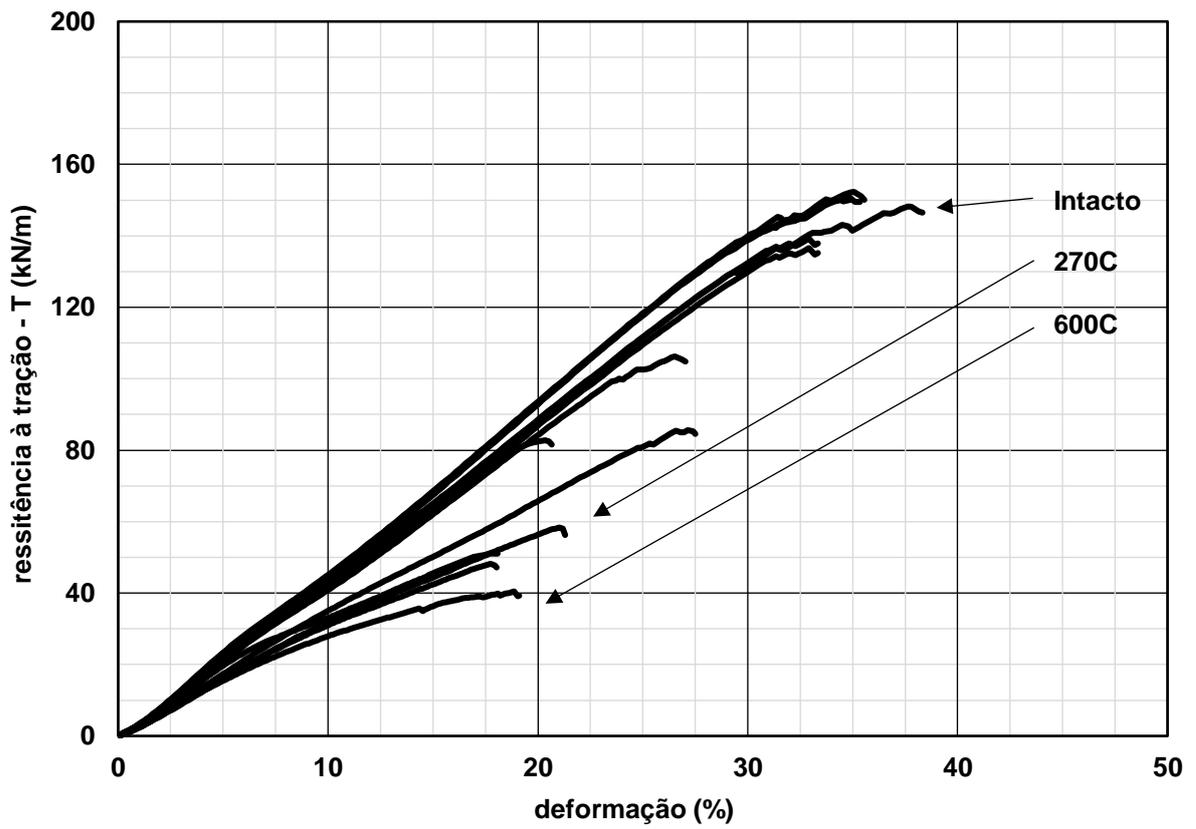


Figura 5.53. Resultados de tração indireta do PET740 após exposição em laboratório

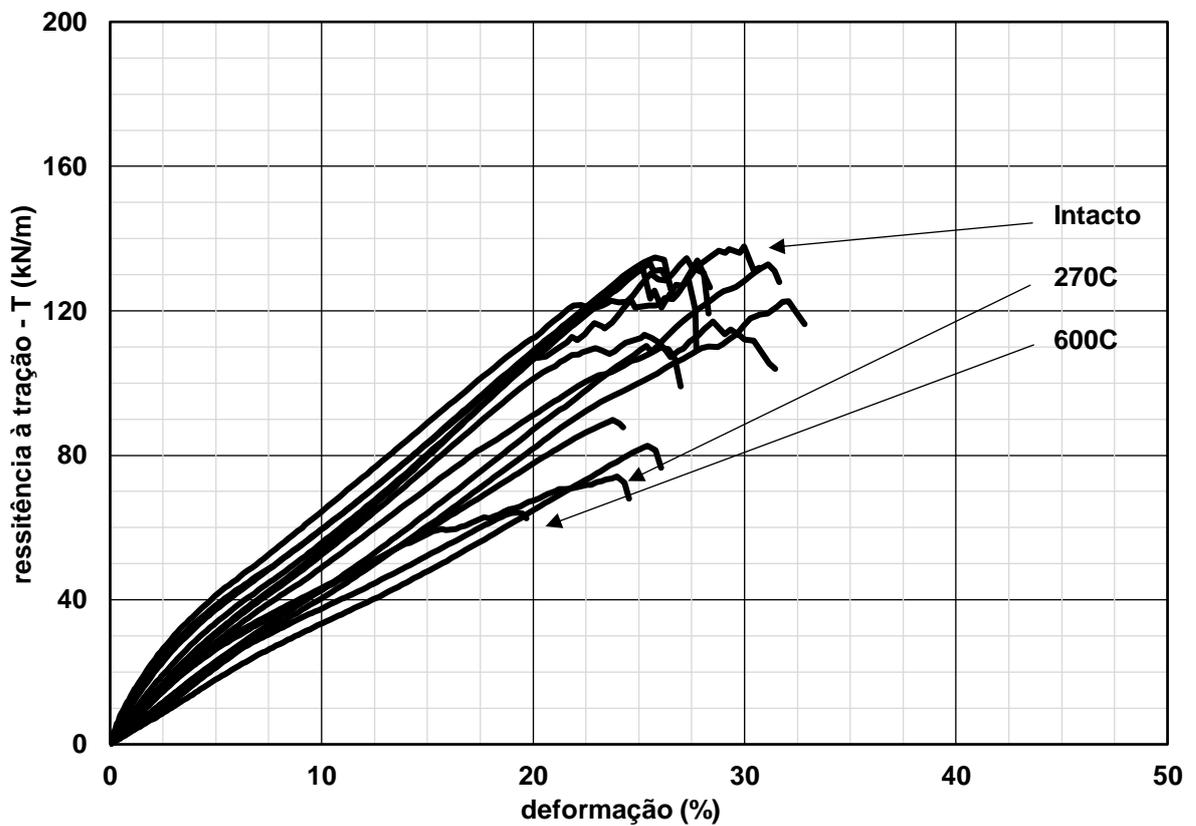


Figura 5.54. Resultados de tração direta do PP925 após exposição em laboratório

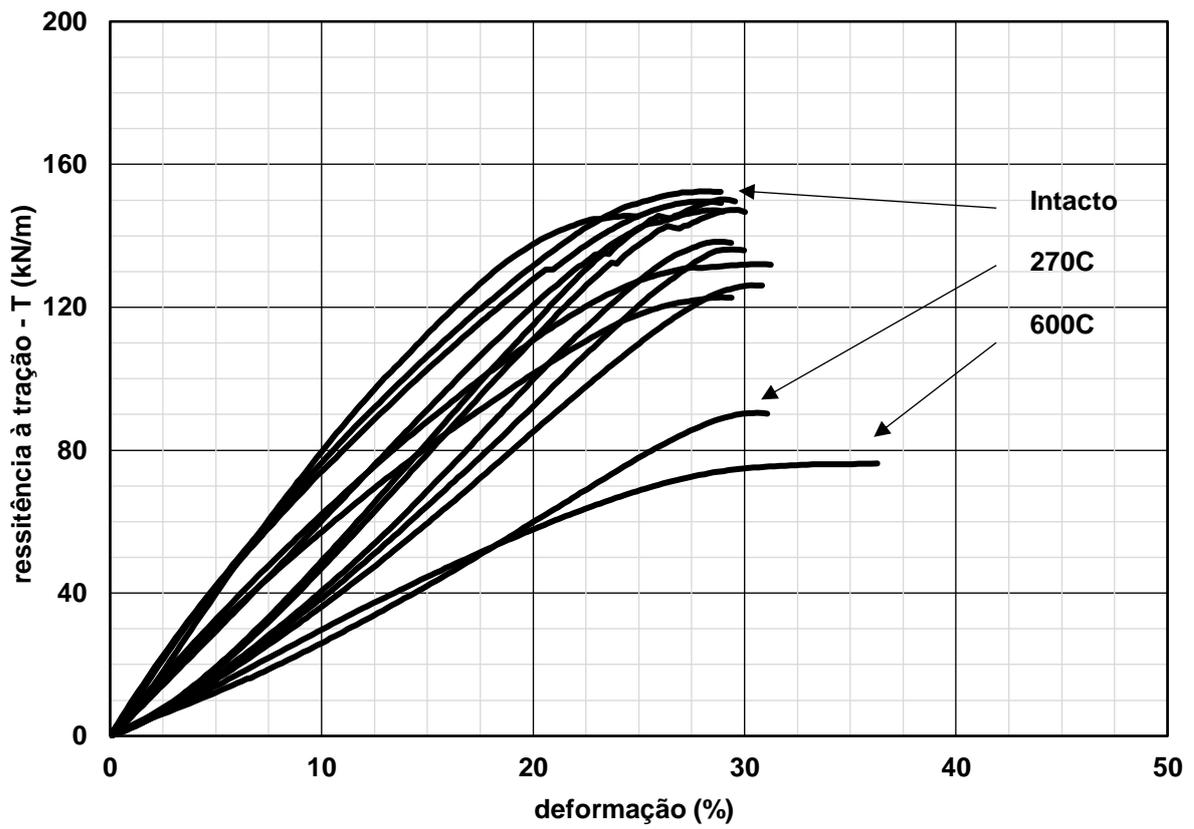
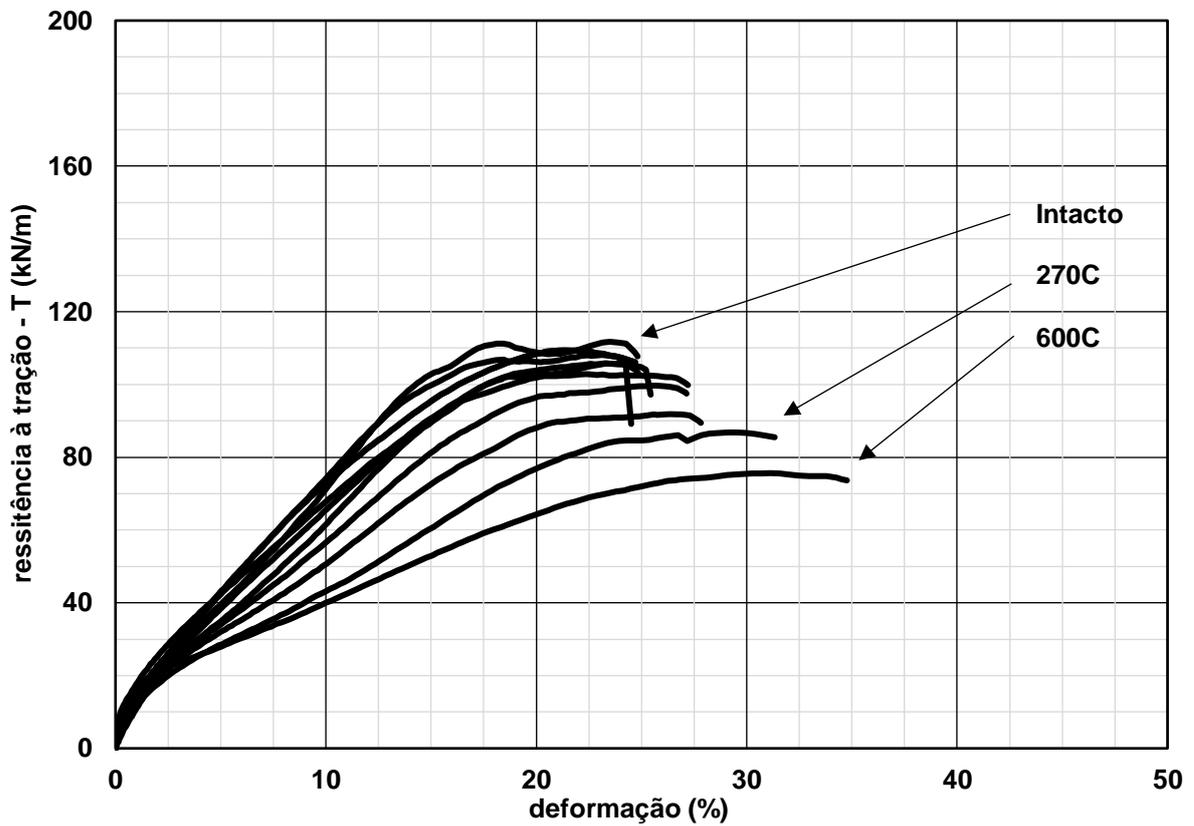


Figura 5.55. Resultados de tração direta do PP925 após exposição em laboratório



## Propriedades de Durabilidade

### Degradação no Campo

As análises de exposição natural foram realizadas durante o período de 2 anos. Nas Tabela 5.18 e Tabela 5.19, são apresentadas análises de tração direta e indireta.

**Tabela 5.18: Resultados de tensão direta após exposição no campo**

meses	Material							
	PET340		PP500		PET740		PP925	
	Resistência	% perda						
3	40,91	22,05	79,90	24,73	67,13	55,46	128,14	12,93
6	19,36	63,12	69,82	34,22	51,80	65,63	113,87	22,62
9	12,98	75,26	67,80	36,13	46,76	68,98	88,83	39,64
12	10,81	79,40	60,05	43,43	41,72	72,33	82,71	43,79
24	5,08	90,31	47,79	54,97	26,04	82,72	66,22	55,00

**Tabela 5.19: Resultados de tensão indireta após exposição no campo**

meses	Material							
	PET340		PP500		PET740		PP925	
	Resistência	% perda						
3	56,49	23,54	97,46	5,67	93,15	29,88	99,20	6,63
6	56,49	23,54	90,56	12,35	84,16	36,65	91,84	13,56
9	34,76	52,94	84,16	18,55	79,81	39,93	80,76	23,98
12	25,78	65,10	77,29	25,19	76,71	42,26	84,24	20,70
24	20,50	72,25	69,95	32,30	58,31	56,11	72,39	31,86

Como podem ser verificados nas Tabelas, os poliésteres perderam mais resistência em razão das intempéries no campo. As reduções são superiores a 50% da resistência inicial. Já com os polipropilenos, os valores foram inferiores a 60%.

Quando comparados os resultados de tração direta e indireta, observa-se que as perdas de resistência possuem a mesma tendência, porém quanto aos valores da tração, estes são superiores. Isso se justifica pelo fato de que, no punção, as garras, possivelmente, geram maior aderência ao prenderem o corpo de prova e o método aplicado, Kirchhoff, com a decomposição de forças na borda do pistão, permitiu calcular tensões maiores. A questão, porém, é o fato de deslocamentos menores possuírem a tendência de gerar decomposição de forças maiores. Por isso, deve-se estar atento às comparações entre estes ensaios e suas principais variantes, como por exemplo, as deformações, que estão na Tabela 5.20 e Tabela 5.21.

**Tabela 5.20: Resultados de deformação na tração direta após exposição no campo**

meses	Material							
	PET340		PP500		PET740		PP925	
	$\epsilon$ (%)	% variação						
3	14,78	10,73	24,20	24,63	21,18	39,23	32,89	-15,27
6	9,29	43,86	21,67	32,50	17,13	50,84	31,90	-11,81
9	6,94	58,04	20,26	36,90	17,73	49,13	32,92	-15,37
12	4,00	75,83	18,78	41,50	15,66	55,05	32,15	-12,70
24	2,60	84,27	16,09	49,88	12,24	64,89	34,05	-19,34

**Tabela 5.21: Resultados de deformação na tração indireta após exposição no campo**

meses	Material							
	PET340		PP500		PET740		PP925	
	$\epsilon$ (%)	% variação						
3	14,92	17,19	22,70	1,46	20,95	32,64	24,23	-5,94
6	11,50	36,19	22,34	3,03	21,24	31,73	23,26	-1,72
9	9,89	45,13	21,81	5,33	19,96	35,84	25,92	-13,35
12	6,67	62,99	19,86	13,81	20,62	33,72	24,78	-8,34
24	8,72	51,62	16,42	28,74	18,31	41,14	25,94	-13,42

De fato, os resultados revelaram a mesma tendência de comportamento que foram apresentados pelos materiais degradados por radiação ultravioleta, em que as deformações dos geotêxteis PET340, PP500 e PET740 diminuíram e para o PP925 houve aumento. Já a rigidez, que pode ser mais bem observada nos gráficos das Figuras Figura 5.56 à Figura 5.59, diminuiu mais nas garras de tração, o que reforça a ideia de melhor aderência dos geotêxteis nas garras de punção.

**Figura 5.56. Tensão e deformação do PET340 após exposição no campo**

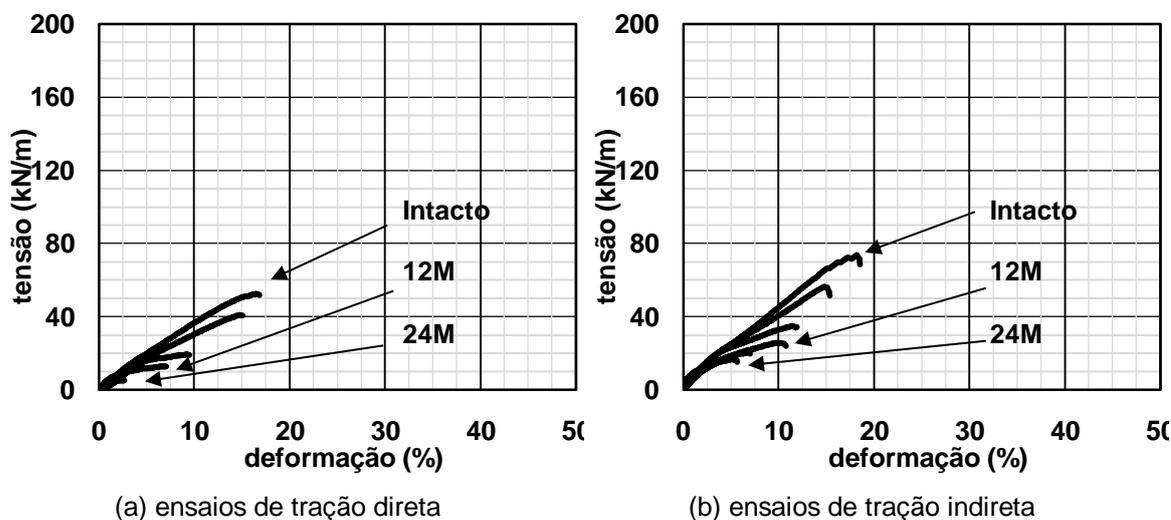


Figura 5.57. Tensão e deformação do PP500 após exposição no campo

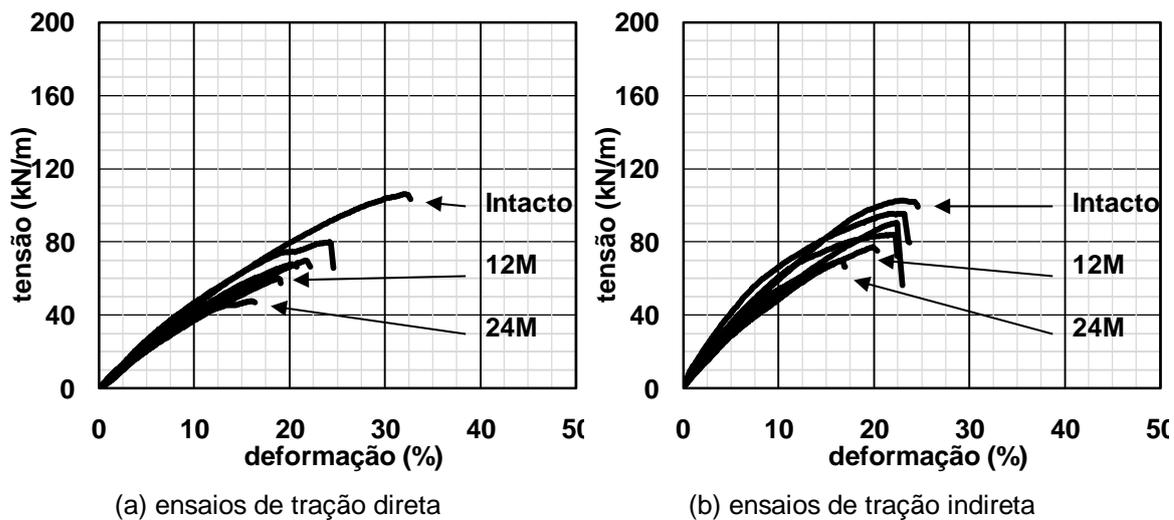


Figura 5.58. Tensão e deformação do PET740 após exposição no campo

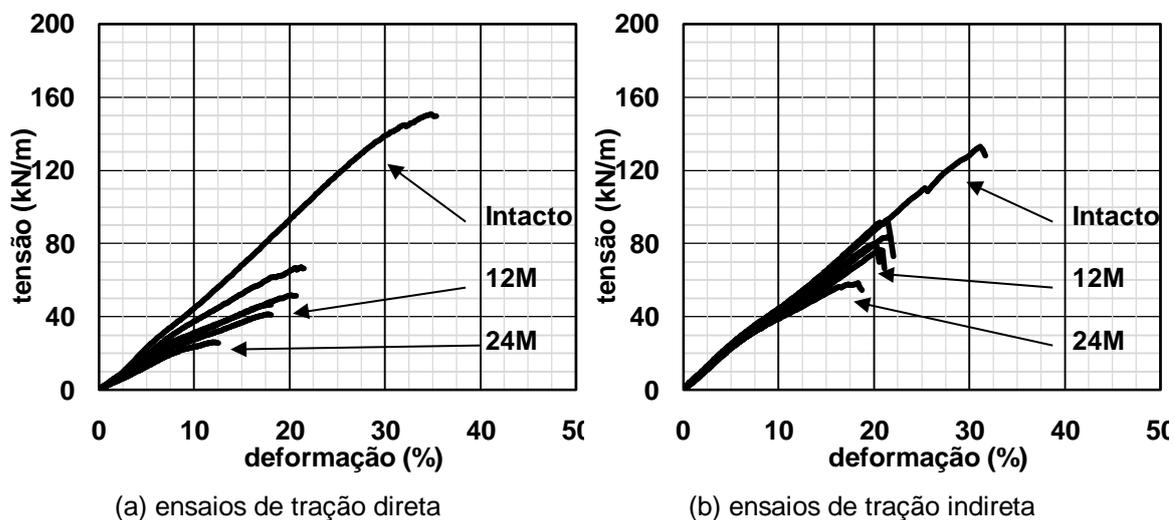
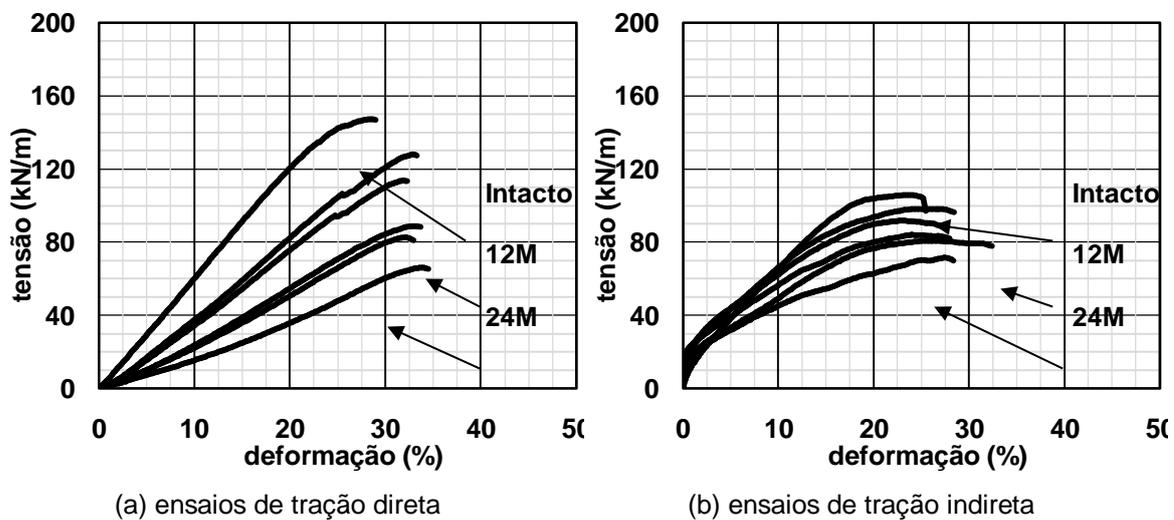


Figura 5.59. Tensão e deformação do PP925 após exposição no campo



## Degradação no Laboratório

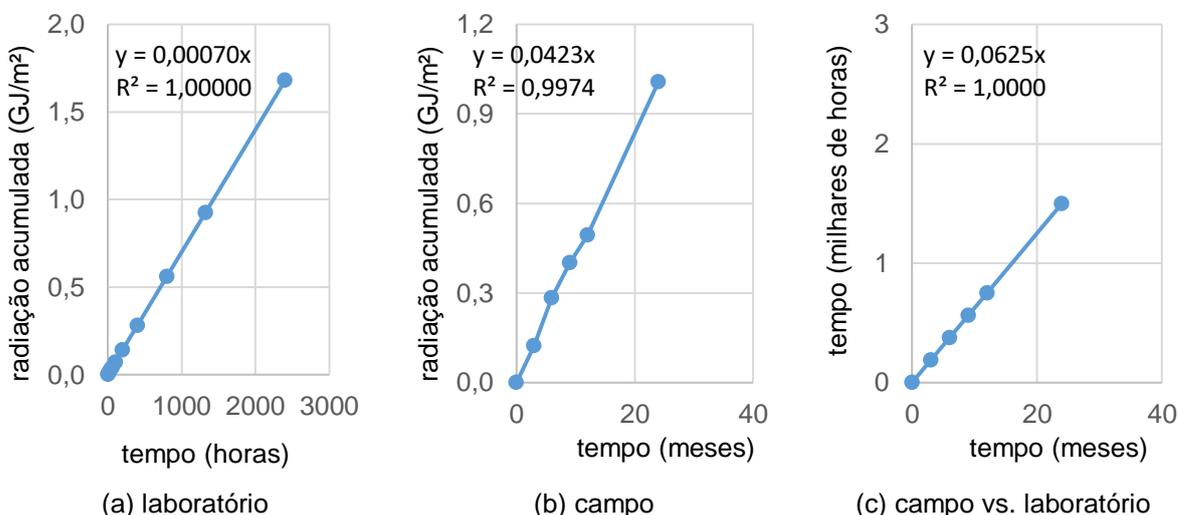
A degradação em laboratório foi utilizada em dois procedimentos já apresentados. O primeiro deles, a saturação e secagem, foi utilizado como mecanismo para acelerar a fluência. Já a radiação ultravioleta foi destacada no ensaio de desempenho. Cada um foi escolhido e definido de acordo com a metodologia. Porém, ainda sobre o ensaio de degradação por UVB, devem-se destacar e comparar algumas características do ensaio, que são relevantes para a análise de caracterização da durabilidade.

Na exposição a um equipamento de ultravioleta, o tempo e quantidade por radiação são quantificados e podem ser comparados com os dados de degradação no campo. A Tabela 5.22 ilustra esta comparação e pode ser transformada, graficamente, para se obter a relação entre a radiação do laboratório e seu equivalente no campo (Figura 5.60).

**Tabela 5.22: Radiação acumulada dos ensaios acelerados e de campo**

radiação ultravioleta				exposição natural	
ciclos	horas totais	horas de UV	radiação (GJ/m <sup>2</sup> )	meses	radiação (GJ/m <sup>2</sup> )
50	400	200	0,14	3,0	0,1269
100	800	400	0,28	6,0	0,2538
130	1600	800	0,56	9,0	0,3807
270	2640	1320	0,924	12,0	0,5076
600	4800	2400	1,68	24,0	1,0152

**Figura 5.60. Relações entre radiações do laboratório e do campo com o tempo**



Pelos gráficos, apresentou-se à radiação ultravioleta emitida pelo equipamento (Figura 5.60a), a radiação emitida naturalmente pelo sol (Figura 5.60b) e a relação entre as radiações exibidas pela Figura 5.60c. Esta, por sua vez, permite identificar o tempo de radiação em laboratório correspondente a um determinado período de exposição ao sol. As equações nos gráficos das figuras permitem este cálculo. De acordo com as Figuras, 1500 horas de exposição acelerada, que totalizam 1,05 GJ/m<sup>2</sup> de radiação, são equivalentes a 25 meses de exposição natural, por exemplo.

### **Parâmetros do Ensaio de Caracterização da Durabilidade**

Para as análises dos parâmetros, foram utilizados os dados de resistência mecânica obtidos na degradação natural no campo e acelerada em laboratório. A comparação destacou os resultados de tensão, deformação e rigidez. A seguir, é apresentada a rotina de cada etapa e a caracterização final da durabilidade.

#### *Índice*

A Tabela 5.23 destaca os valores dos índices obtidos para resistência à tração máxima do PET340 com os parâmetros obtidos para a realização da curva.

**Tabela 5.23: Radiação acumulada dos ensaios acelerados e de campo**

Parâmetros do Campo					Parâmetros do Laboratório			
Tempo		%	Índice		Tempo horas	%	Índice	
dias	horas		x100	equação			x100	equação
0	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
90	2160	0,22	22,05	41,65	8	0,04	3,69	1,17
180	4320	0,63	63,12	64,24	16	0,01	0,50	2,33
270	6480	0,75	75,26	76,49	24	0,02	1,83	3,48
360	8640	0,79	79,40	83,13	32	0,02	1,82	4,61
720	17280	0,90	90,31	90,32	40	0,04	4,21	5,73
R <sup>2</sup>			<b>0,956</b>		80	0,29	29,47	
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		200	0,43	43,02	
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		400	0,61	60,93	44,12
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		800	0,72	72,14	67,96
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		1040	0,82	82,08	76,62
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		2160	0,90	90,18	92,54
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		4800	0,97	97,11	95,94
R <sup>2</sup>			<b>0,985</b>		R <sup>2</sup> <b>0,985</b>			

<i>I<sub>ult</sub></i>	<b>91</b>
<i>T<sub>0</sub></i>	<b>3530</b>

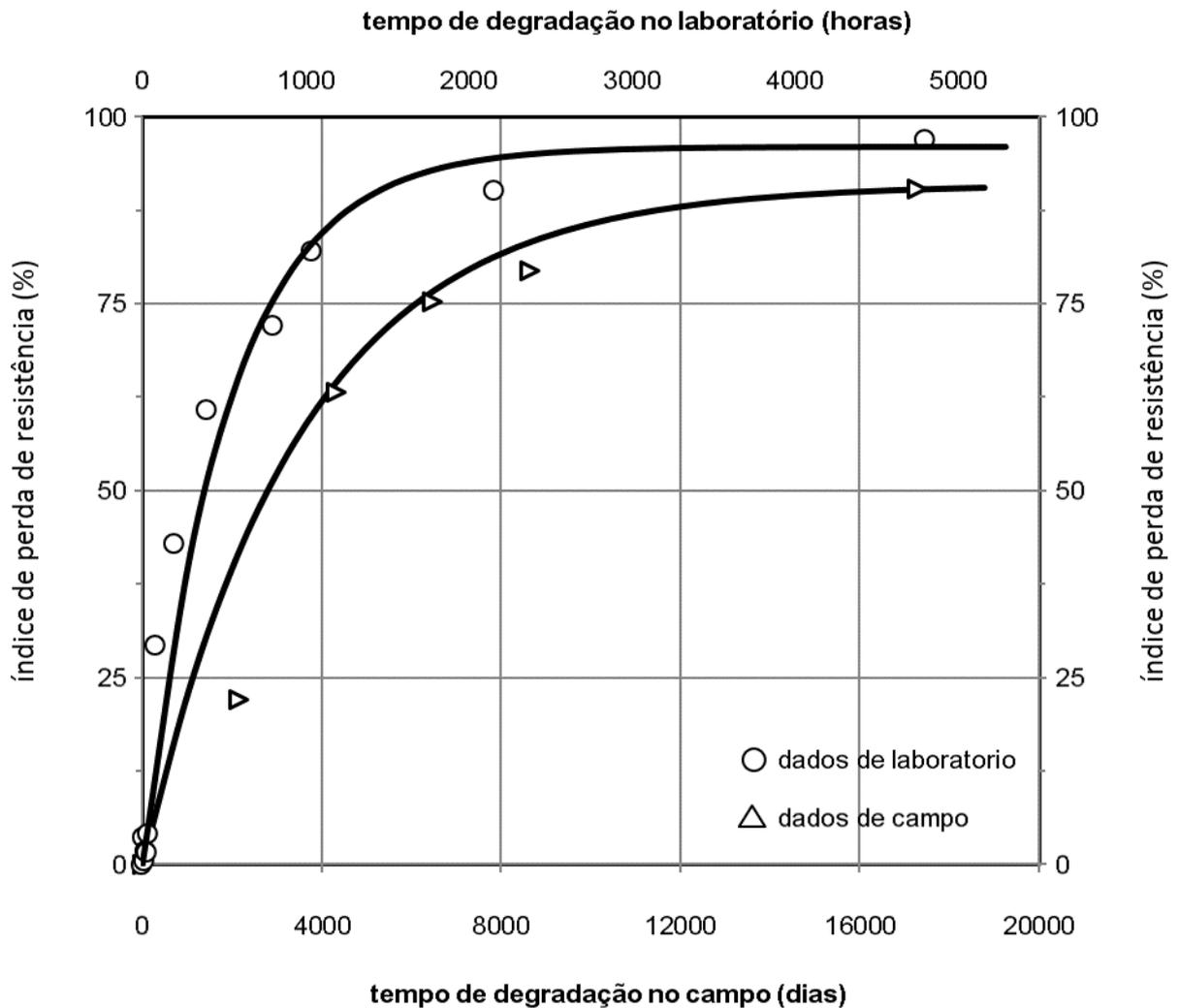
  

<i>I<sub>ult</sub></i>	<b>96</b>
<i>T<sub>0</sub></i>	<b>650</b>

## Curva

A Figura 5.61 mostra a curva de variação da propriedade de resistência do geotêxtil PET340 com o tempo.

Figura 5.61. Relação entre o índice  $I$  do campo e do laboratório com o tempo



## Modelo

Com as curvas, os parâmetros  $I_{ult}$ ,  $T_0$  e  $F_t$  puderam ser obtidos de acordo com as propriedades estudadas. A partir destes dados, é possível determinar a previsão do comportamento do material. A Tabela 5.24 apresenta a análise de todos os índices e parâmetros analisados, incluindo o de durabilidade, do geotêxtil PET340.

Como pode ser observado na Tabela 5.24, o parâmetro  $F_t$  tende a ser o mesmo, independente da propriedade analisada. Sendo assim, foram encontrados os

parâmetros de durabilidade para os geotêxteis tecidos H018, H015, PET740 e PP925 de 5,2, 5,2, 4,2 e 6,4, respectivamente. A partir desta relação, é possível identificar o tempo de serviço de acordo com as restrições de projeto, ou seja, de acordo com limites de propriedade escolhida. Os valores encontrados permitem, assim, avaliar a durabilidade dos materiais por meio deste método.

**Tabela 5.24: Parâmetros de durabilidade do geotêxtil PET340**

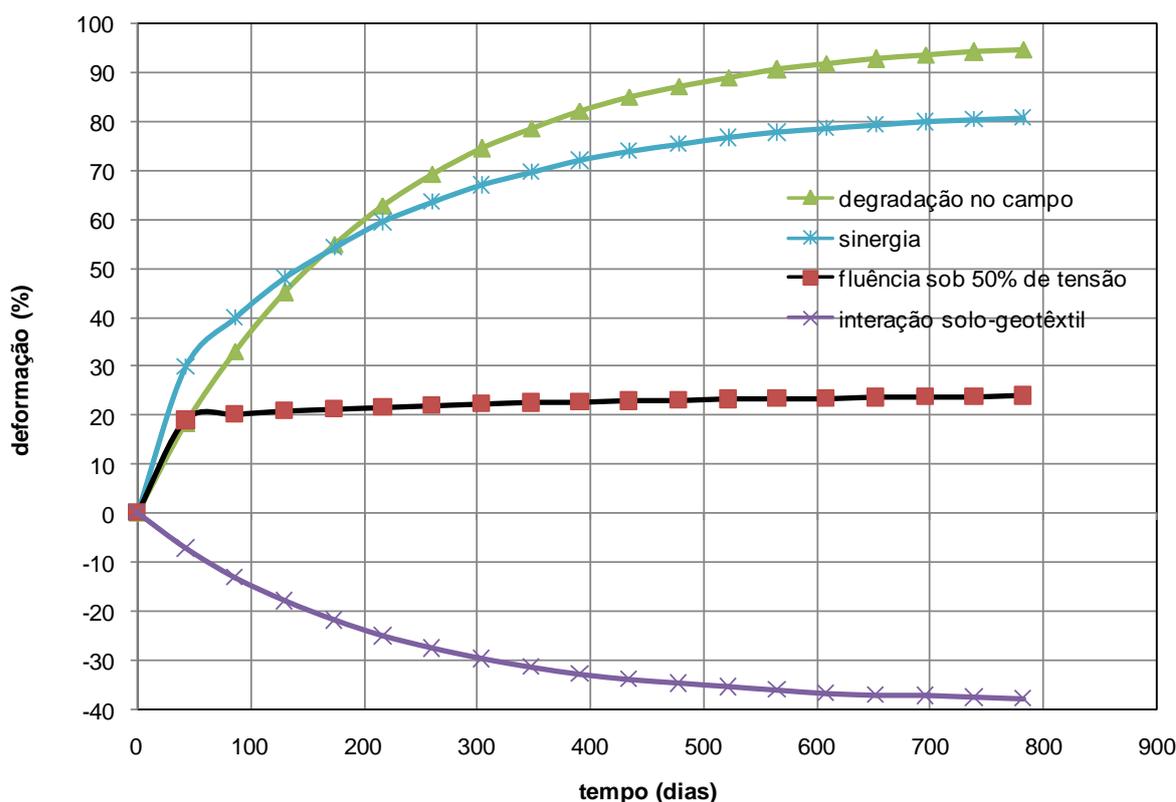
Parâmetro	Campo			Laboratório				
	$I_{ult}$	$T_0$	$R^2$	$I_{ult}$	$T_0$	$R^2$	$F_t$	
máx	T(kN/m)	91	3530	0,956	96	650	0,985	5,4
	$\epsilon$ (%)	85	3600	0,895	88,1	700	0,863	5,1
	Jsec (kN/m)	39	2400	0,634	79	450	0,605	5,3
T 10%	$\epsilon$ (%)	95	4500	0,825	98	900	0,974	5,0
	Jsec (kN/m)	50	1200	0,834	87	240	0,577	5,0
	Jtg (kN/m)	60	4854	0,051	100	950	0,792	5,1
T 50%	$\epsilon$ (%)	97	5000	0,939	80	970	0,505	5,2
	Jsec (kN/m)	78	7052	0,588	90	1400	0,910	5,0
	Jtg (kN/m)	38	4500	0,461	100	840	0,026	5,4
T(catálogo) 50%	$\epsilon$ (%)	86	5000	0,940	90	980	0,816	5,1
	Jsec (kN/m)	52	10200	0,517	90	1885	0,890	5,4
	Jtg (kN/m)	1250	14000	0,887	900	2805	0,073	5,0
	Jsec (kN/m) - linear	20	19000	0,000	150	3805	0,010	5,0
						média	0,79	5,17
						desvio	0,17	0,16
						C.V	21,58%	3,23%

### 5.3 Sinergia entre ensaios de fluência, desempenho e durabilidade

Fundamentalmente, no caso de FTT, temos a sinergia entre a fluência, a interface solo-geotêxtil, destacada na caracterização como propriedade de desempenho, e a durabilidade. A soma destes efeitos pode fornecer outros dados importantes no que diz respeito a sua vida útil em obra.

A deformação, no dimensionamento, é um valor característico que determina a vida útil do material. Considerando o limite de utilização desta propriedade sob 50% de tensão, foi avaliada a durabilidade dos materiais sob as condições citadas. A Figura 5.62 caracteriza o geotêxtil PET340 de acordo com o procedimento.

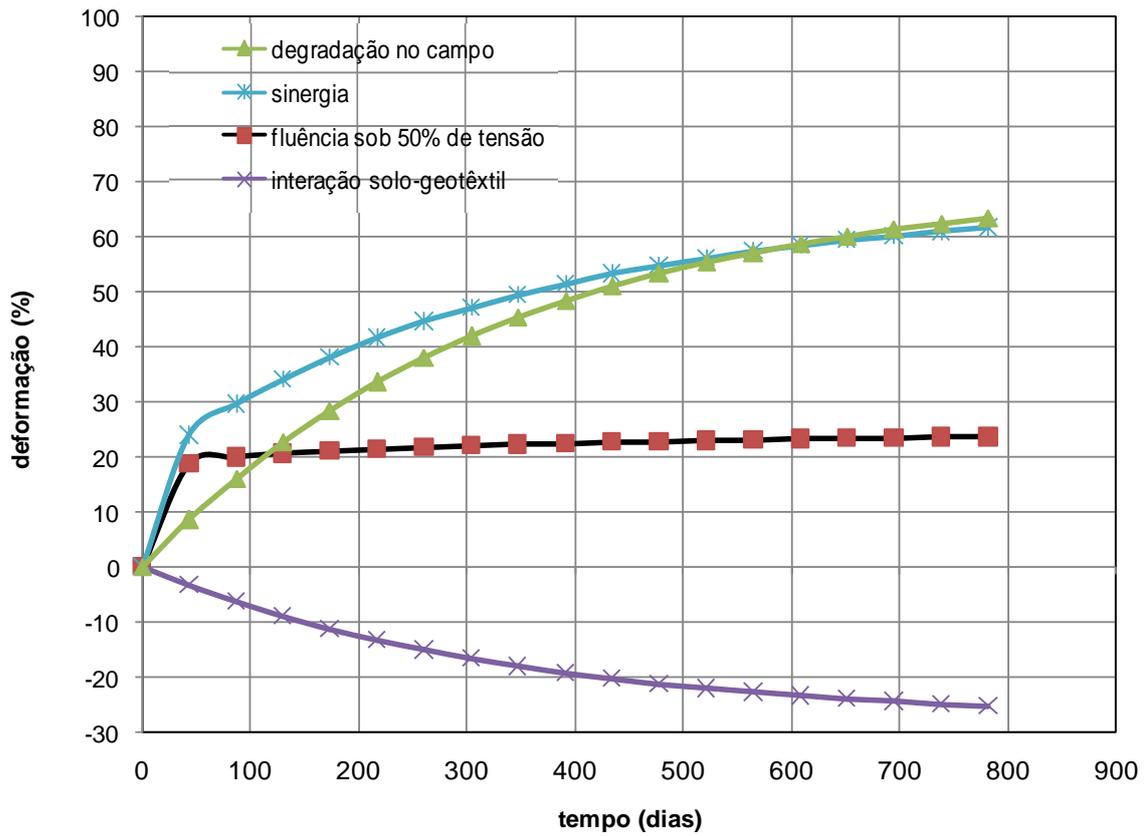
Figura 5.62. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PET340



Em condições naturais, sob exposição natural no campo, como já foi apresentado, o material PET340 em, aproximadamente, 150 dias chegou a 9% de deformação, ou seja, metade do que poderia alcançar na ruptura. O comportamento por fluência, por sua vez, indicou durabilidade elevada sob 50% de carregamento. E, de fato, o efeito da interface solo-geotêxtil, em níveis de densidade de areia próximo à máxima, contribui com a vida útil da FTT, restringindo sua deformação devido ao atrito. Sendo assim, no exemplo citado, o efeito da sinergia melhora com o tempo, pois a fluência neste material não foi determinante para alcançar o limite de utilização do geotêxtil em projeto. Porém, nas condições de deformação em 50%, o limite de utilização fica em torno de 140 dias. Sem a condição de interação com a areia em densidade máxima, este tempo diminuiria para 86 dias.

Os geotêxteis PP500, PET740 e PP925 são caracterizados nas Figuras Figura 5.63 à Figura 5.65. As mesmas análises foram realizadas nestes materiais e os dados encontrados foram de 521 dias sob efeito isolado da degradação por radiação, 434 considerando a sinergia e 217 sem ação do atrito com a areia no geotêxtil PP500. Já com o PET740, os tempos foram de 173, 217 e 130, respectivamente. O PP925, por sua vez, apresentou os valores de 565, 304 e 130.

**Figura 5.63. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PP500**



**Figura 5.64. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PET740**

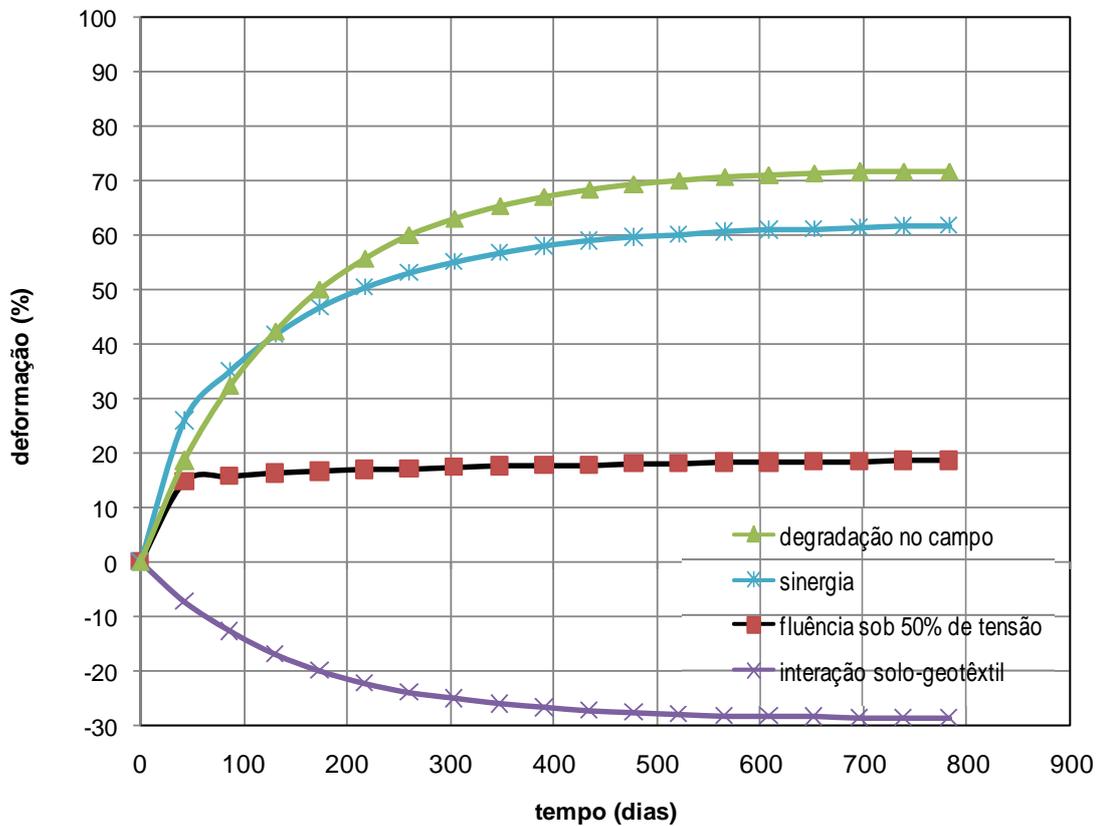
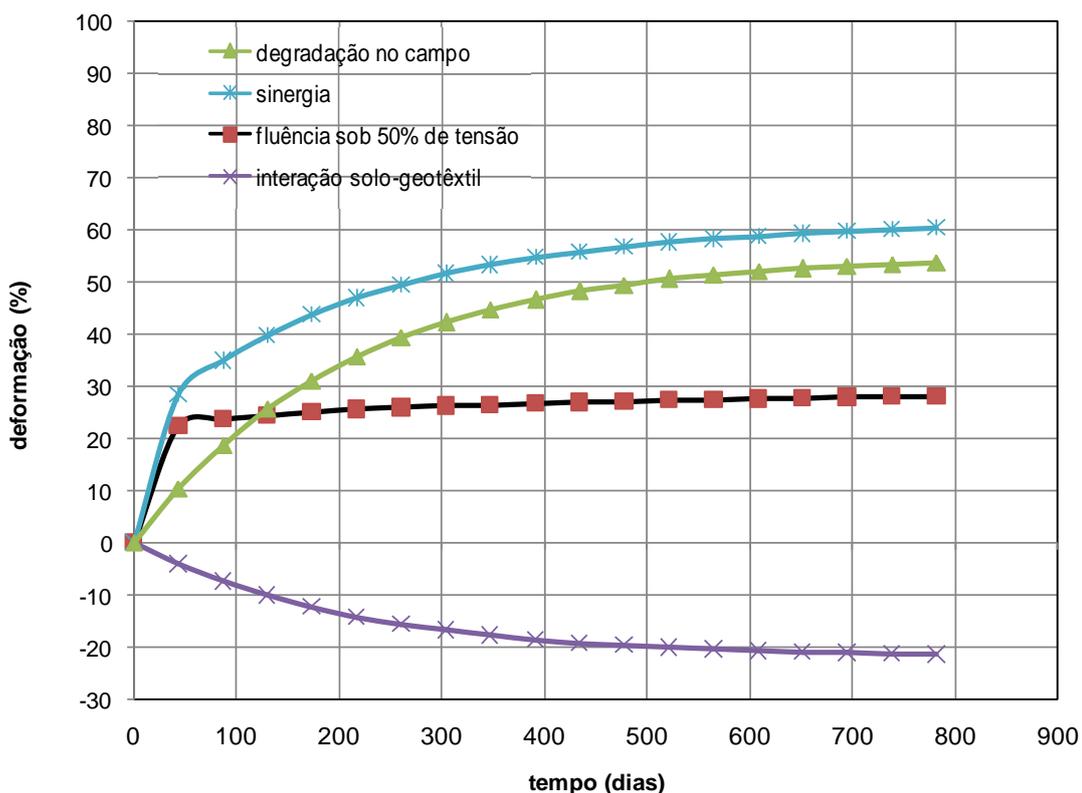


Figura 5.65. Sinergia e efeitos isolados simulando condições de campo do PP925



Nestas considerações, é interessante destacar como cada efeito isolado contribui com a resposta final da durabilidade dos materiais. Os poliésteres da pesquisa, o PP500 e PET740, apresentaram susceptibilidade à degradação elevada e as propriedades, em geral, variaram próxima a ruptura dos materiais. Em contrapartida, a fluência e seu desempenho sob confinamento são qualidades que podem viabilizar o uso destes materiais em projetos com pouco efeito de intempéries. Já os polipropilenos, PP500 e PP925, revelaram ideias contrárias, mas que, para tal aplicação, mostraram melhores resultados.

#### 5.4 Considerações Finais

A extensa análise e as discussões dos resultados apresentaram um grande debate sobre as características físicas e mecânicas dos geotêxteis tecidos. Foram destacados pontos importantes para o desenvolvimento dos temas seguintes. Destaque para a tração indireta e os ensaios de fluência por punção, os quais foram um diferencial na tese.

Os ensaios de fluência permitiram avaliar os dados com precisão em apenas 3 dias de ensaio. Assim foi possível avaliar as deformações para 42 dias sem problemas e, além disso, gerar extrapolações, as quais necessitariam melhores ajustes com ensaios em níveis de carga maiores.

A propriedade de desempenho gerou um banco de dados e análises importantes para a tese e também discussões a respeito da interface solo-geotêxtil com o ensaio de puncionamento confinado e a radiação como mecanismos de degradação sempre muito eficiente para avaliar as propriedades dos geossintéticos

Os ensaios de durabilidade e previsões de vida útil dos materiais foram um diferencial nos dois aspectos discutidos. Foram realizados ensaios de fluência acelerada sob ação de ciclagem em saturação e secagem, bem como, a sinergia dos efeitos da fluência, confinamento e degradação nos materiais.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões Gerais

O presente trabalho procurou atingir o objetivo principal de avaliação do comportamento geomecânico e de durabilidade de geotêxteis tecidos utilizados em aplicações como FTT, com ênfase nas variações dos parâmetros dos materiais provocadas pela alteração dos geotêxteis tecidos, e de previsão do comportamento do geotêxteis de FTT aplicados em obras hidráulicas a longo prazo.

O extenso programa experimental proposto para avaliação do comportamento geomecânico e de durabilidade dos geotêxteis tecidos foi cumprido com êxito. No programa foram construídos equipamentos e uma metodologia para avaliação da alterabilidade de geotêxteis tecidos como FTT. Esta metodologia foi aplicada ao materiais cujas solicitações simulam o uso em obras hidráulicas de proteção costeira e ribeirinha. A metodologia garantiu a simulação, de forma acelerada no laboratório, da alteração natural no campo dos geotêxteis tecidos através do equipamento de condensação e radiação ultravioleta. É proposto também um procedimento de laboratório onde o material sofre fluência acelerada simulando a condição de solicitação de campo.

Fez-se a apresentação de modelo para estimativa do comportamento de matérias geossintéticos devido aos processos de degradação que o material sofre no meio ambiente. No modelo, são propostos dois parâmetros relacionados às características de durabilidade e da alterabilidade do material.

A sobreposição de efeitos observado em diferentes procedimentos de ensaios, que caracteriza a sinergia no comportamento característico do material, mostra que há uma concordância entre os procedimentos individuais de ensaio e os com degradação simultânea.

No contexto essencial da pesquisa, conclui-se que os objetivos visados foram alcançados, permitindo uma maior compreensão dos mecanismos constituintes e associados ao comportamento físico, mecânico, hidráulico e de durabilidade dos geotêxteis estudados. Este capítulo, desta forma, apresenta e resume as conclusões específicas obtidas na presente pesquisa.

## **6.2 Conclusões Específicas**

### **6.2.1 Quanto à Degradação das Amostras**

#### **- Degradação Natural no Campo**

Esta análise apresentada pela metodologia é muito importante para avaliar os parâmetros de durabilidade que podem variar com o ambiente exógeno. Desta maneira a melhor forma de avaliar a agressividade do meio são com os dados meteorológicos que auxiliam na avaliação dos mecanismos de degradação que estarão em contato com o material. Nesta pesquisa a degradação natural mostrou a forte influência exercida pelos raios ultravioletas na alterabilidade dos geotêxteis tecidos e o quanto isso afeta o material com o tempo de exposição prolongado.

#### **- Degradação Acelerada no Laboratório**

A degradação acelerada, por sua vez, é um mecanismo controlado e, pelo qual, são induzidos os mecanismos de degradação desejados. A pesquisa enfatizou dois processos com resultados satisfatórios. Utilizaram-se equipamento de condensação e radiação ultravioleta e o equipamento de saturação e secagem. Os procedimentos permitiram a análise da durabilidade dos geotêxteis e asseguraram que, através da metodologia, outros geossintéticos obtenham seus parâmetros de durabilidade.

### **6.2.2 Quanto à Caracterização**

#### **Propriedades Físicas**

#### **- Gramatura**

Não houve variação significativa nesta propriedade nos geotêxteis tecidos estudados ao longo do tempo. Observou-se que, nos poliésteres, a colmatação gerou aumento de massa como foi descrito, porém a estatística não há diferença entre os dados do material intacto e alterado.

#### - Espessura

Os poliésteres aumentaram sua espessura, enquanto os polipropilenos continuaram sem variação. A microscopia foi utilizada para avaliar estas mudanças, já que a colmatação ficou nítida na superfície destes materiais com a passar do tempo. Neste caso os multifilamentos facilitaram a acumulação de sujeira e microrganismos.

#### - Ensaio de Porosidade

A porosidade relaciona gramatura e espessura, por isso pode-se concluir que apenas os poliésteres apresentaram variação com o tempo de degradação. Estas características influenciaram diretamente as propriedades hidráulicas, as quais são comentadas a nos próximos tópicos conclusivos.

#### - Ensaio de Microscopia

Este ensaio qualitativo auxiliou na compreensão dos ensaios mecânicos e hidráulicos na comparação entre os materiais intactos, degradados naturalmente no campo e degradados aceleradamente em laboratório. As maiores diferenças ocorreram em tempos maiores de alteração, onde é possível verificar a colmatação dos geotêxteis de poliésteres por sujeira e material biológico e ruptura das fibras, enquanto os polipropilenos apresentaram fissura nos laminetes.

#### - Ensaio de Espectrofotometria

As análises mostraram-se satisfatória para caracterização dos geotêxteis degradados. Nos resultados de absorvância não foi obtido informações concretas com ensaios nas amostras de polipropileno, porém com os poliésteres foi possível avaliar. Nestes materiais, o comportamento da absorvância nos dois ambientes foi similar. Já nos resultados de espectroscopia FTIR os dados obtidos restringiram-se as amostras de baixa gramatura PET340 e PP500. Foi possível avaliar a formação de carbonila com a alteração das amostras. Os resultados indicaram maior suscetibilidade à degradação dos poliésteres estudados com a formação de carbonila 2 vezes maior, valor similar a perda de resistência.

## **Propriedades Mecânicas**

### **- Ensaio de Tração**

A gramatura influenciou diretamente na resposta dos ensaios com a mudança da garra. As exigências atuais por materiais mais resistentes geram a necessidade de ferramentas mais adequadas para a realização dos ensaios. A pesquisa não foi inviabilizada por isso, já que os dados normatizados garantem boa comparação com as respostas de ensaios em outras formas de testes.

### **- Ensaio de Puncionamento**

Além da habitual resposta com os parâmetros de força e deslocamento, foi aprofundada a discussão da tração indireta. O modelo Kirchhoff utilizado para análise das deformação nos ensaios adequou-se a geometria e análise dos resultados. Foram obtidos bons resultados que permitem comparação com o ensaio padrão e possível equivalência, principalmente nos materiais de baixa gramatura.

### **- Ensaio de Fluência**

O ensaio com possibilidade de obtenção de parâmetro direto de durabilidade foi amplamente discutido e com apresentação de bons resultados com uso de parâmetros com banco de dados reduzidos.

Foi possível estudar e compreender melhor os coeficientes das equações da modelo de fluência convencional e acelerada com o banco de dados obtidos nos dois procedimentos. Com eles foram extrapolados os dados para previsão da ruptura natural, com ensaio de fluência realizado em laboratório com temperatura e umidade controlados, e acelerada, utilizando a câmara de degradação com ciclagem de saturação e secagem das amostras.

As avaliações dos ensaios com apenas 3 dias permitiram estudos rápidos e eficientes da deformação por fluência. Os polipropilenos deformaram menos que os poliésteres e obtiveram previsão de ruptura 2 vezes menor de acordo com sua característica de gramatura.

## **Propriedades Hidráulica**

### **- Ensaio de Permeabilidade**

Os materiais estudados foram avaliados antes e depois do procedimento de degradação natural no campo e acelerada no laboratório. O comportamento foi diferente comparando os métodos de exposição. O efeito da colmatação no campo os poliésteres diminuíram a permeabilidade e permissividade. Na microscopia foram observados sujeira e microrganismos. Já os polipropilenos houve aumento destas propriedades com as fissuras presentes na superfície dos monofilamentos.

A degradação acelerada no laboratório, por sua vez, promoveu o efeito contrário nos poliésteres, os quais não apresentaram o efeito predominante da colmatação. Os polipropilenos, por sua vez, apresentaram comportamento similar.

### **- Ensaio de Abertura de Filtração**

Em virtude do tamanho da amostra para a realização do ensaio, só foi possível análise de amostras com 2 anos de degradação natural no campo. Observou-se aumento do  $O_{90}$  e, conseqüentemente, da permeabilidade no PET340, PP500 e PP925. O PET740, por sua vez, diminuiu. A colmatação neste material foi superior a outros fatores que alteram esta propriedade, como por exemplo, danos superficiais.

## **Propriedades de Desempenho**

### **- Ensaio de Puncionamento Confinado**

O ensaio mostrou como o comportamento tensão e deformação do geotêxtil é alterado com a resistência da areia durante a penetração do pistão. Foi observado que a resistência do conjunto aumenta, enquanto o deslocamento que gera as deformações no geotêxtil diminuíram. As granulometrias das areias utilizadas mostraram que o aumento do diâmetro médio das partículas gera maiores vazios e conseqüentemente maior deslocamento do geotêxtil quando está sendo perfurado.

#### - Ensaio de Radiação Ultravioleta

Fica claro que exposição acima de 2000h no equipamento de condensação e radiação ultravioleta agride severamente os geossintéticos. Os geotêxteis de poliéster foram mais afetados que os de polipropileno. A perda de resistência final do PET350, PP500, PET740 e PP925 foram, respectivamente, 97%, 55%, 73% e 48%.

### **6.2.3 Quanto ao Equipamento**

#### - Espectrofotômetro UV-Vis

O equipamento mostrou-se uma alternativa rápida de ensaios não destrutivos na análise de material degradado de geotêxtil. Foi possível avaliar qualitativamente, através da absorbância, quanto o material foi degradado de acordo com a absorção de cada comprimento de onda ultravioleta ou visível.

#### - Espectrofotômetro FTIR

As análises neste equipamento também apresentou dados consistência em análises qualitativas e quantitativas sobre os geotêxteis. Foi possível avaliar o nível de degradação de acordo com a formação de carbonilas.

#### - Fluência Não Confinada

O equipamento desenvolvido mostrou bom desempenho e sistema de nivelamento bom para o sistema de tração e razoável para o sistema de tração, o qual possuía menor curso de deslocamento do nível.

#### - Fluência Acelerada

O sistema obteve excelente correlação com o equipamento convencional. A aceleração promoveu maiores deslocamentos e, conseqüentemente, deformação, o que permitiu avaliar de forma acelerada a fluência com degradação.

#### - Equipamento de Permeabilidade

O projeto foi pensando para estudo a longo prazo dos geossintéticos. O desenvolvimento e construção do equipamento foi planejado com a possibilidade de realizar a caracterização das amostras intactas e degradadas antes dos ensaios destrutivos por puncionamento. Com isso foi possível avaliar o comportamento das amostras alteradas naturalmente no campo e aceleradamente no laboratório.

#### - Ensaio de Abertura de Filtração

Neste ensaio, a construção do equipamento foi em função do tempo de realização do ensaio e disponibilidade de recursos e acessórios no laboratório. O equipamento utiliza os vibradores do ensaio de peneiramento e para fixar os corpos de prova aproveitou-se da estrutura de peneiras. Sendo assim, não foi necessárias grandes intervenções para a construção do equipamento. A desvantagem foi a necessidade de corpos de prova em maior dimensão, o que dificulta em análises em vários níveis de degradação.

### **6.2.4 Quanto aos Ensaio de Durabilidade**

Os dois procedimentos consideram as principais solicitações dos geotêxteis tecidos usados como FTT. Foram utilizados como forma de avaliar a durabilidade dos materiais desta pesquisa, a saturação e secagem e a condensação e radiação ultravioleta. De maneira muito específica, as análises dos procedimentos apresentaram resultados similares em sua resposta por tempo de vida útil sob condições de degradação e fluência acelerada em laboratório.

O primeiro deles, a fluência acelerada com procedimento de saturação e secagem, apresentou durabilidade menor como resposta. Foi um resultado esperado, uma vez que a literatura já citava a degradação por ciclagem, utilizando a saturação e secagem, como procedimento mais intenso. O segundo procedimento, considerando a sinergia, caracterizou, através das formas da fluência convencional, puncionamento confinado e degradação por ultravioleta, resposta similar, porém durabilidade relativamente maior.

### **6.2.5 Quanto ao Parâmetro de Durabilidade**

O modelo de caracterização dos geotêxteis com o parâmetro de durabilidade apresentado por Dias Filho *et al.* (2016b) mostrou que é possível classificar os geossintéticos com a metodologia apresentada pelos autores. Através deste modelo é possível obter os parâmetros de durabilidade e alterabilidade de cada material.

### **6.2.6 Sugestões para Trabalhos Futuros**

No contexto desse trabalho sugere-se que novas pesquisas sejam direcionadas no aprimoramento, adaptação e criação de outros procedimentos de ensaios no laboratório e no campo para estudo da durabilidade de geossintéticos. Assim, propõe-se os seguintes temas específicos para trabalhos futuros:

Criar equipamento com dimensões reduzidas para avaliar os ensaios de abertura de filtração em níveis de alteração diferentes, permitindo uma melhor análise desta propriedade hidráulica após procedimentos de degradação.

Investigar com maior profundidade a aplicabilidade de análises por espectrofotometria por UV-Visível e FTIR em geossintéticos. Esses ensaios podem mostrar o potencial de procedimentos não destrutivos para caracterização da durabilidade dos materiais estudados.

Para os ensaios de puncionamento confinado sugere-se avaliar outras granulometrias de areia para que seja criada uma tendência relacionada ao comportamento de tensão e deformação ao conjunto solo e geotêxtil puncionado. Para uma caracterização mais ampla e completa pode-se avaliar as parcelas de tensão e deformação do geotêxtil com a aplicação do modelos de Kirchhoff. Este ensaio ainda pode se estender para análises de fluência convencional e acelerada, a fim de avaliar uma situação comum em que ocorrem em aplicações de FTT.

## REFERÊNCIAS

- \_. **ABNT NBR 12824/1993, Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga - Método de ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ : [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 1993. p. 5.
- \_. **ABNT NBR 15226/2005, Geossintéticos - Determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2005. p. 14.
- \_. **ISO 9864-05, Geosynthetics - Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products.** International Organization for Standardization. Geneve, GE: [www.iso.org](http://www.iso.org). 2005. p. 2.
- \_. **ABNT NBR ISO 12236/2013, Geossintéticos - Ensaio de puncionameno estático (punção CBR).** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2006. p. 7.
- \_. **ASTM D5322-98, Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2009. p. 3.
- \_. **ASTM D5261-10, Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2010. p. 3.
- \_. **ASTM G90-10, Standard Practice for Performing Accelerated Outdoor Weathering of Nonmetallic Materials Using Concentrated Natural Sunlight.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2010. p. 11.
- \_. **ASTM D4595-11, Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2011. p. 13.

- \_. **ASTM D5818-11, Standard Practice for Exposure and Retrieval of Samples to Evaluate Installation Damage of Geosynthetics.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2011. p. 3.
- \_. **ASTM D6364-06, Standard Test Method for Determining Short-Term Compression Behavior of Geosynthetics.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2011. p. 6.
- \_. **ASTM D5101-12, Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2012. p. 8.
- \_. **ASTM D5199-12, Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2012. p. 4.
- \_. **ASTM D7361-07, Standard Test Method for Accelerated Compressive Creep of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2012. p. 8.
- \_. **ISO 25619-1, Geosynthetics - Determination of compression behaviour - Part 1: Compressive creep properties.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2012. p. 20.
- \_. **ABNT NBR ISO 10319/2013, Geossintéticos - Ensaio de tração faixa larga.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 11.
- \_. **ABNT NBR ISO 11058/2013, Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ : [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 18.
- \_. **ABNT NBR ISO 12956/2013, Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da abertura de filtração característica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ : [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 11.

- \_. **ABNT NBR ISO 12957-1/2013, Geossintéticos - Determinação das características de atrito.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 8.
- \_. **ABNT NBR ISO 12957-2/2013, Geossintéticos - Determinação das características de atrito.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ : [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 12.
- \_. **ABNT NBR ISO 12958/2013, Geotêxteis e produtos correlatos - Determinação da capacidade de fluxo no plano.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ : [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 13.
- \_. **ABNT NBR ISO 13433/2013, Geossintéticos - Ensaio de perfuração dinâmica (ensaio de queda de cone).** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 7.
- \_. **ABNT NBR ISO 25619-1/2013, Geossintéticos - Determinação do comportamento em compressão.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 20.
- \_. **ABNT NBR ISO 9863-1/2013, Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificadas.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 5.
- \_. **ABNT NBR ISO 9864/2013, Geossintéticos - Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2013. p. 2.
- \_. **ASTM D3786 / D3786M-13, Standard Test Method for Bursting Strength of Textile Fabrics—Diaphragm Bursting Strength Tester Method.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2013. p. 4.
- \_. **ASTM D4716 / D4716M-14, Standard Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic**

- Using a Constant Head.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2013. p. 10.
- \_. **ASTM D4716 / D4716M-14, Standard Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2013. p. 10.
- \_. **ISO 16474-1, Paints and varnishes - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 1: General guidance.** International Organization for Standardization. Geneva, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2013. p. 23.
- \_. **ASTM D4355 / D4355M-14, Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2014. p. 5.
- \_. **ASTM D4355 / D4355M-14, Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2014. p. 5.
- \_. **ASTM D4884 / D4884M-14a, Standard Test Method for Strength of Sewn or Bonded Seams of Geotextiles.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2014. p. 6.
- \_. **ASTM D5321 / D5321M-14, Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2014. p. 11.
- \_. **ASTM D6241-14, Standard Test Method for Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2014. p. 6.

- \_. **ISO 12956, Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the characteristic opening size.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2014. p. 10.
- \_. **ISO 13427, Geosynthetics - Abrasion damage simulation (sliding block test).** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2014. p. 4.
- \_. **ABNT NBR 15380/2015, Tintas para construção civil — Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais - Resistência à radiação UV e à condensação de água pelo ensaio acelerado.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ : [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). 2015. p. 9.
- \_. **ASTM D4533 / D4533M-15, Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2015. p. 6.
- \_. **ASTM D4632 / D4632M-15a, Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2015. p. 5.
- \_. **ASTM D5716 / D5716M-15, Standard Test Method for Measuring the Rate of Well Discharge by Circular Orifice Weir.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2015. p. 5.
- \_. **ISO 10319, Geosynthetics - Wide-width tensile test.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2015. p. 14.
- \_. **ISO 12957-1, Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 1: Direct shear test.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2015. p. 8.
- \_. **ISO 12957-2, Geosynthetics - Determination of friction characteristics - Part 2: Inclined plane test.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2015. p. 10.

- \_. **ASTM D1987-07, Standard Test Method for Biological Clogging of Geotextile or Soil/Geotextile Filters.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 6.
- \_. **ASTM D2702-05, Standard Practice for Rubber Chemicals - Determination of Infrared Absorption Characteristics.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 4.
- \_. **ASTM D4751-16, Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 9.
- \_. **ASTM D4886-10, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Geotextiles (Sand Paper/Sliding Block Method).** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 3.
- \_. **ASTM D5262-07, Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 16.
- \_. **ASTM D5262-07, Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 16.
- \_. **ASTM D5819-05, Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA: [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 11.
- \_. **ASTM D5970 / D5970M-16, Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 3.
- \_. **ASTM D6389-99, Standard Practice for Tests to Evaluate the Chemical Resistance of Geotextiles to Liquids.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 4.

- \_. **ASTM E169-16, Standard Practices for General Techniques of Ultraviolet-Visible Quantitative Analysis.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 6.
- \_. **ASTM G154-16, Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials.** American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA : [www.astm.org](http://www.astm.org). 2016. p. 11.
- \_. **ATLAS. Ultra-Accelerated Exposure Testing.** ATLAS Material Test solutions. Disponível: <http://atlas-mts.com/services/natural-weathering-testingservices/accelerated-weathering/ultra-accelerated-exposure-testing/>. Acesso em 04 março 2015. 2016. p. 1.
- \_. **ISO 10640, Plastics - Methodology for assessing polymer photoageing by FTIR and UV/visible spectroscopy.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2016. p. 29.
- \_. **ISO 11058, Geotextiles and geotextile-related products - Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2016. p. 17.
- \_. **ISO 12236, Geosynthetics - Static puncture test (CBR test).** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2016. p. 6.
- \_. **ISO 12958, Geotextiles and geotextile-related products - Determination of water flow capacity in their plane.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2016. p. 13.
- \_. **ISO 13431, Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2016. p. 16.
- \_. **ISO 13433, Geosynthetics - Dynamic perforation test (cone drop test).** International Organization for Standardization. Geneve, GE : [www.iso.org](http://www.iso.org). 2016. p. 6.

- \_. **ISO 9863-1, Geosynthetics - Determination of thickness at specified pressures - Part 1: Single layers.** International Organization for Standardization. Geneve, GE: www.iso.org. 2016. p. 5.
- \_. **ISO/TR 12960, Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to liquids.** International Organization for Standardization. Geneve, GE : www.iso.org. 2016. p. 6.
- \_. **ISO/TS 13434/2008, Geosynthetics - Guidelines for the assessment of durability.** International Organization for Standardization. Geneve, GE: www.iso.org. 2016. p. 42.
- ABRAMENTO, M. **Durabilidade e Comportamento de longo prazo de Geossintéticos - Parte 1. Propriedades Mecânicas e Hidráulicas.** Geossintéticos 95. São Paulo: SP. 1995a. p. 216-225.
- ABRAMENTO, M. **Durabilidade e Comportamento de longo prazo de Geossintéticos - Parte 2. Durabilidade dos materiais.** Geossintéticos 95. São Paulo: SP. 1995b. p. 226-235.
- AHN, S. J. et al. **Evaluation of Time-Temperature Dependence of Nonwoven Geotextiles by Salt Water Spray Test.** Korean Geosynthetics Conference. Daegu: Korea. 2013. p. 101-105.
- ALLEN, T. M.; BATHURST, R. J. **Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage.** Geosynthetics International. 3: 3. 1996. p. 407-439.
- ALTOÉ, L. M. et al. **Study of Natural and Degradation by Salt Spray of Red Ceramics Incorporated with Ornamental Rock Waste.** Materials Science Forum. 727-728: 1. 2012. p. 1519-1524.
- ALVAREZ , E.; RUBIO, R.; RICALDE, H. **Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico.** Geotextiles and Geomembranes. 25: 4. 2007. p. 233-241.

- ANDRAWES, K. Z.; MCGOWN, A.; KABIR, M. H. **Uniaxial Strength Testing of Woven and Nonwoven Geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes. 1: 1. 1984. p. 41-56.
- ANTMAN, S. S.; SCHAGERL, M. **Slumping instabilities of elastic membranes holding liquids and gases**. International Journal of Non-Linear Mechanics. 40: 8. 2005. p. 1112-1138.
- ARMSTRONG , J. M. **Low-cost shore protection on the great lakes: a demonstration/research program**. Coastal Engineering Proceedings. 1: 15. 1976. p. 2858-2887.
- ARMSTRONG, J. M. **Low-cost shore protection on the great lakes: a demonstration/research program**. Coastal Engineering Proceedings. Ann Arbor: ASCE. 1976. p. 2858-2887.
- ASTRUC, A. et al. **Accelerated oxidative ageing of polypropylene fibers in aqueous medium under high oxygen pressure as studied by thermal analysis**. Polymer Testing. 23: 8. 2004. p. 919-923.
- ATMATZIDIS, D. K. et al. **On the measurement of pore sizes for nonwoven polypropylene geotextiles**. Proceedings 8th International Conference on Yokohama. 2: 1. 2006. p. 553-556.
- AVESANI, F. P. B. **Fluência Confinada e Acelerada em Geossintéticos**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. São Carlos: SP. 2013. p. 134.
- AVULA, X. J. R.; URAL, O. **Large elastic deformations of a closed axisymmetric membrane simultaneously inflated by a gas and a liquid**. Shell Structures and Climatic Influences. University of Calgary: Canadian. 1972. p. 163-170.
- BECKER, L. D. B.; NUNES, A. L. L. S. **Influence of soil confinement on the creep behavior of geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes. 43: 4. 2015. p. 351-358.

- BENJAMIM, C. V. S. et al. **Installation and ultraviolet exposure damage of geotextiles**. 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: UK. 2008. p. 8.
- BERGADO, D. T. et al. **Interaction of nonwoven needle-punched geotextiles under axisymmetric loading conditions**. Geotextiles and geomembranes. 19: 5. 2001. p. 299-328.
- BERNARDI, M.; LOSTUMBO, J. **Creep Rupture vs Strain-Limited Creep - Analytical and Practical Comparison**. Geosynthetics Conference. Portland: Oregon. 2015. p. 5.
- BEZUIJEN, A.; PILARCZYK, K. W. **Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: Filters, revetments and sand filled structures**. V European Geosynthetics Congress - EuroGeo5. Ghent University: Department of Civil engineering. 2012. p. 65-80.
- BOGOSSIAN , F. et al. **Continuous retaining dikes by means of geotextiles**. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas: IFAI. 1982. p. 211-216.
- BOLT, A.; DUSZYŃSKA, A. **Static Puncture Resistance of Non-Woven Geotextiles. X International Conference**. Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius: Lithuania. 2010. p. 1083-1088.
- BRACHMAN, R. W. I.; GUDINA, S. **Gravel contacts and geomembrane strains for a GM/CCL composite liner**. Geotextiles and Geomembranes. 26: 6. 2008. p. 448-459.
- BRACHMAN, R. W. I.; SABIR, A. **Geomembrane puncture and strains from stones in an underlying clay layer**. Geotextiles and Geomembranes. 28: 4. 2010. p. 335-343.
- BRAND, E. W.; PANG, P. R. **Durability of geotextiles to outdoor exposure in Hong Kong**. Journal of geotechnical engineering. 117: 7. 1991. p. 979-1000.

- BRUSCAS, A. **City declares emergency at storm-torn geotubes.** North Coast News. Ocean Shores, Washington. 01 de janeiro de 2015. Disponível: <http://northcoastnews.com>. Acesso em 04 março 2015. 2015. p. 2.
- BUDIMAN, J. **Effects of temperature on physical behavior of geomembrane.** Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Singapore: Southeast Asia. 1994. p. 1093-1096.
- BUENO, B. S. **Propriedades, especificações e ensaios.** IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Geossintéticos | REGEO. Porto Alegre: RS. 2003. p. 15.
- BUENO, B. S.; COSTANZI, M. A.; ZORNBERG, J. G. **Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles.** Geosynthetics International. 12: 6. 2005. p. 276-287.
- BUENO, B. S.; SILVA, A.; VALENTIN, C. A. **Projeto e construção de um sistema para registrar e gerenciar resultados de ensaios de tração em materiais geossintéticos.** Congresso da Qualidade em Metrologia, Rede Metrológica do Estado de São Paulo - REMESP. São Paulo: São Paulo. 2007. p. 8.
- CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. **Design method for geotextile tubes considering strain formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry.** Geotextiles and Geomembranes. 29: 3. 2011. p. 201-210.
- CARNEIRO, J. R. **Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental:** a importância da incorporação de aditivos químicos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: Portugal. 2012. p. 602.
- CARNEIRO, J. R.; ALMEIDA, P. J.; LOPES, M. L. C. **Durability of polypropylene geotextiles exposed to several degradation agents – importance of the incorporation of a chemical stabiliser on the geotextiles formulation.** 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama: Japan. 2006. p. 1559-1562.

- CARNEIRO, J. R.; ALMEIDA, P. J.; LOPES, M. L. C. **Avaliação da resistência dos geotêxteis à termo oxidação: um novo método vs o método clássico.** 11º Congresso Nacional de Geotecnia. 4: 1. 2008a. p. 331-338.
- CARNEIRO, J. R.; ALMEIDA, P. J.; LOPES, M. L. C. **Thermo-oxidation of polypropylene geotextiles.** 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: UK. 2008b. p. 7.
- CARNEIRO, J. R.; ALMEIDA, P. J.; LOPES, M. L. C. **Natural weathering of geosynthetics in Portugal” Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.** 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Millpress: Rotterdam. 2009. p. 901-904.
- CARROLL, R. P. **Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes.** Geotechnical Fabrics Report. 12: 4. 1994. p. 4.
- CASTELO, J.; GUTIERREZ, J. **High compressive resistance drainage geocomposites.** Ingenieria Civil. Madri: Espanha. 2014. p. 77-82.
- CAZZUFFI, D. et al. **The Mechanical Properties of Geotextiles: Italian Standard and Interlaboratory Test Comparison.** Third International Conference on Geotextiles. Vienna: Áustria. 1986. p. 695-700.
- CHU, J.; GUO, W.; YAN, S. W. **Geosynthetic tubes and geosynthetic mats: analyses and applications.** Geotechnical Engineering. 42: 1. 2011. p. 10.
- COLMANETTI, J. P. **Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento.** Doutorado em Geotecnia na Universidade de Brasília. Brasília: DF. 2006. p. 303.
- CORREA, B. R. F. et al. **Análise do Comportamento Tensão vs. Deformação de Geotêxteis Tecidos Submetidos a Ensaios de Tração Não Confinada em Diferentes Tipos de Garra.** VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - Geossintéticos | Regeo 2015. Brasília: Brasil. 2015. p. 6.

- CORREIA, N. S.; BUENO, B. S. **Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties.** Geotextiles and Geomembranes. 29: 2. 2011. p. 92-101.
- COSTA, C. M. L. **Fluência de Geotêxteis.** Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo. São Paulo: SP. 1999. p. 97.
- COSTANZI, M. A. et al. **Avaliação da Fluência de Geotêxteis não Tecidos com Ensaios Acelerados.** Solos e Rochas. 26: 3. 2003. p. 217-228.
- CRAWFORD, R. J. **Plastics Engineering.** Department of Mechanical Aeronautical and Manufacturing Engineering. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1998. p. 505.
- CURCIO, M. S. et al. **TiO<sub>2</sub> sol-gel for formaldehyde photodegradation using polymeric support: photocatalysis efficiency versus material stability.** Environmental Science and Pollution Research. 22: 2. 2015. p. 800-809.
- DEN HOEDT, G. **Durability Experience in the Netherlands 1958-1988. Durability and Aging of Geosynthetics.** Geosynthetic Research Institute. Publication of: Commission of the European Communities. 1989. p. 82-94.
- DEROMBISE, G. et al. **Influence of finish treatment on the durability of aramid fibers aged under an alkaline environment.** Journal of Applied Polymer Science. 117: 2. 2010. p. 888-898.
- DIAS FILHO, J. L. E. **Estudo do Efeito da Energia de Desgaste na Previsão Da Durabilidade de Gnaises Ornamentais de Pádua-RJ.** Dissertação de Mestrado. Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes: RJ. 2012. p. 98.
- DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Estudo do Efeito da Energia de Desgaste na Previsão da Durabilidade de Gnaisse Ornamental de Pádua-RJ.** XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Porto de Galinhas: Pernambuco. 2012. p. 7.
- DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Performance evaluation of bending strength to predict durability of ornamental gneiss from Santo Antônio de Pádua, RJ, BR.** 2nd

International Symposium on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites. Napoli: Itália. 2013b. p. 353–357.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Evaluation of tensile properties in geotextile fabrics by varying the width of the sample.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlim: Alemanha. 2014a. p. 5.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Determinação Indireta da Tração de Geotêxteis Tecidos Através de Ensaio de Puncionamento.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia: GO. 2014b. p. 6.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Dias Filho, J. L. E., Corrêa, B. R. F., Maia, P. C. A.; Xavier, G. C. (2015a). Analysis of Indirect Tension in Woven Geotextile Through Non-Standardized Test.** XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Buenos Aires: Argentina. 2015a. p. 5.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Estudo do Puncionamento Confinado em Areias para Análise do Comportamento Tensão Deformação em Geotubos.** VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Geossintéticos | REGEO. Brasília: Brasil. 2015b. p. 6.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Woven geotextile nonconventional creep test performed with static puncture test.** 3rd Pan-American Regional Conference on Geosynthetics - GeoAmericas 2016. Miami: Califórnia. 2016a. p. 10.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **Durability of Ornamental Gneisses from Pádua-RJ as Covering Stone.** The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 21: 5. 2016b. p. 1957 – 1976.

DIAS FILHO, J. L. E. et al. **CBR Test in Geosynthetics with Confined Support Using Sands.** The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 21: 5. 2016c. p. 1681 - 1689.

DIAS FILHO, J. L. E.; MAIA, P. C. A.; XAVIER, G. C. **Critical Analysis of Laboratory Testing Procedures for Setting Properties of Rock Materials.** ISRM

Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure-SBMR 2014. Goiânia: GO. 2014c. p. 8.

DIAS FILHO, J. L. E.; XAVIER, G. C.; MAIA, P. C. A. **Análise da durabilidade de gnaiss através de ensaio de desgaste.** *Vértices*. 15: 3. 2013a. p. 7-16.

DIERICKX, W.; BERGHE, P. V. D. **Natural weathering of textiles used in agricultural applications.** *Geotextiles and Geomembranes*. 22: 4. 2004. p. 255-272.

DIESING, W. E.; GRUBB, D. G.; CHENG, S. C. J. **High altitude exposure testing of geotextiles in the Peruvian Andes.** *Geosynthetics International*. 6: 2. 1999. p. 119-144.

ERCHINGER, E. F. **Geotextile tubes filled with sand for beach erosion control, North Sea Coast, Germany.** *Geosynthetics Case Histories*. Richmond, BC, Canada: BiTech Publishers. 1993. p. 102-103.

EWAIS, A. M. R.; ROWE, R. K.; SCHEIRS, J. **Degradation behaviour of HDPE geomembranes with high and low initial high-pressure oxidative induction time.** *Geotextiles and Geomembranes*. 42: 2. 2014. p. 111-126.

FARJALLAT, J. E. S. **Relato sobre o Tema: Desagregabilidade de Rochas e Problemas Relativos à sua Aplicabilidade.** 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada. 2: A. 1972. p. 19-53.

FOWLER, J.; BAGBY, R. M.; TRAINER, E. **Dewatering Sewage Sludge with Geotextile Tubes.** *Dredged Materials Management: Options and Environmental Considerations. Proceedings of a Conference*. 30: 2. 2000. p. 80-83.

FOWLER, J. **Geotextile tubes and flood control.** *Geotechnical Fabrics Report*. Mississippi: TRIS. 1997. p. 28-37.

FRANCA, F. A. N.; BUENO, B. S. **Creep behavior of geosynthetics using confined-accelerated tests.** *Geosynthetics International*. 18: 55. 2011. p. 242-254.

- FRANÇA, F. A. N.; BUENO, B. S. **Creep behavior of geosynthetics using confined-accelerated tests**. Geosynthetics International. 18: 5. 2011. p. 242-254.
- FRANÇA, F. A. N.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. **Novo equipamento para realização de ensaios de fluência simultaneamente confinados e acelerados**. VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Geossintéticos | Regeo. Brasília: Brasil. 2011. p. 8.
- FRANÇA, F. A. N.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. **Ensaio de Tração de Faixa Larga em Geossintéticos Submetidos a Ensaio de Fluência em Temperaturas Elevadas e Sob Confinamento em Solo**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia: GO. 2014. p. 7.
- GAMSKI, K. **Geomembranes: classification, use and performance**. Geotextiles and Geomembranes. 1: 2. 1984. p. 85-117.
- GHAVANLOO, E.; DANESHMAND, F. **The equilibrium shapes of air-filled heavy membrane tubes resting on inclined planes**. Mechanics Research Communications. 36: 3. 2009a. p. 405-412.
- GHAVANLOO, E.; DANESHMAND, F. **Two-dimensional analytical analysis of equilibrium shape of inflated geomembrane tube resting on rigid foundation with arbitrary shape**. Geotextiles and Geomembranes. 27: 2. 2009b. p. 99-106.
- GHAZAVI, M.; ROUSTAEI, M. **Freeze-thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer**. Cold Regions Science and Technology. 89: 1. 2013. p. 22-29.
- GHOSH, T. K. **Puncture resistance of pre-strained geotextiles and its relation to uniaxial tensile strain at failure**. Geotextiles and Geomembranes. 16: 5. 1998. p. 293-302.

- GIJSMAN, P.; SAMPERS, J. **The influence of oxygen pressure and temperature on the UV-degradation chemistry of polyethylene.** Polymer degradation and stability. 58: 1. 1997. p. 55-59.
- GIROUD, J. P. **Geotextiles and geomembranes.** Geotextiles and Geomembranes. 1: 1. 1984. p. 5-40.
- GIROUD, J. P.; ZHAO, A.; RICHARSON, G. N. **Effect of Thickness reduction on Geosynthetic Hydraulic Transmissivity.** Geosynthetic International. 7: 4-5. 2000. p. 433-452.
- GOMES, L. M. F.; SANTOS, F. R.; NUNES, M. F. **Durability based on resistance tests of geosynthetics submerged in a sulphurous environment.** 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama: Japan. 2006. p. 1551-1554.
- GOMES, R. O.; VIDAL, D. M. **Importância da Garantia de Qualidade dos Resultados de Ensaio em Laboratórios Certificados.** XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG: São Paulo. 2002. p. 6.
- GREENWOOD, J. H.; CURSON, A. **Life prediction of the oxidation of geogrids by three different methods.** Geotextiles and geomembranes. 34: 1. 2012. p. 93-99.
- GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F.; VOSKAMP, W. **Durability of geosynthetics.** CUR Building & Infrastructure. Report: 243. 2012. p. 295.
- GUIMARÃES, M. G. A. et al. **Durabilidade de Geotêxtil Tecido de Polipropileno sob Fluência e Agentes Climáticos.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia: GO. 2014. p. 7.
- GUIMARÃES, M. G. A. et al. **Durability of a Polypropylene Woven Geotextile under Climatic and Chemical Agents.** Modern Environmental Science and Engineering, Academic Star Publishing Company. 1: 4. 2015. p. 172-177.

- GULEC, S. B.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H. **Effect of acidic mine drainage on the polymer properties of an HDPE geomembrane.** Geosynthetics International. 11: 2. 2004. p. 60-72.
- GUO, W. et al. **Geosynthetic mattress: Analytical solution and verification.** Geotextiles and Geomembranes. 37: 1. 2013. p. 74-80.
- GUO, W. et al. **A simplified method for design of geosynthetic tubes.** Geotextiles and Geomembranes. 42: 5. 2014. p. 421-427.
- GUO, W.; CHU, J, J.; YAN, S. W. **Effect of subgrade soil stiffness on the design of geosynthetic tube.** Geotextiles and Geomembranes. 29: 3. 2011. p. 277-284.
- GUO, Y. C. et al. **Study on short-and long-term creep behavior of plastics geogrid.** Polymer testing. 24: 6. 2005. p. 793-798.
- GUTMAN, A. L. **Low-cost shoreline protection in Massachusetts.** Coastal Structures'79. New York: ASCE. 1979. p. 373-387.
- GUTMAN, A. L. **Low-cost shoreline protection in Massachusetts.** Coastal Structures'79. New York: ASCE. 1979. p. 373-387.
- HARDCASTLE, H. K. **Effects of moisture, location, and angle on automotive paint system appearance during natural weathering.** JCT coatingstech. 5: 1. 2008. p. 44-52.
- HEERTEN, G. **History and current state of geosynthetic applications in Germany.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: Alemanha. 2014. p. 30.
- HEIBAUM, M. **Geosynthetics for waterways and flood protection structures - Controlling the interaction of water and soil.** Geotextiles and Geomembranes. 42: 4. 2014. p. 374-393.
- HORNSEY, W. P. et al. **Geotextile sand container shoreline protection systems: Design and application.** Geotextiles and Geomembranes. 29: 4. 2011. p. 425-439.

- HORNSEY, W. P. et al. **Geotextile sand container shoreline protection systems: design and application.** Geotextiles and Geomembranes. 29: 4. 2011. p. 425-439.
- HSIEH, C. W.; WANG, J. B. **Clamping Mechanism Effects on the Puncture Resistance Tests of High Strength Geotextiles.** Journal of GeoEngineering. 3: 2. 2008. p. 47-53.
- HSIEH, J. C.; PLAUT, R. H. **Free vibrations of inflatable dams.** Acta mechanica. 85: 3. 1990. p. 207-220.
- HSIEH, J. C.; PLAUT, R. H.; YUCEL, O. **Vibrations of an inextensible cylindrical membrane inflated with liquid.** Journal of Fluids and Structures. 3: 2. 1989. p. 151-163.
- HSUAN, Y. G. et al. **Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics.** 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: UK. 2008. p. 40.
- INGOLD, T. S. **The Geotextiles and Geomembranes Manual.** First Edition. United Kingdom: Elsevier Advanced Technology. 1994. p. 610.
- INGOLD, T. S.; MILLER, K. S. **Geotextiles Handbook.** Transport Research Laboratory. London, UK: Thomas Telford. 1988. p. 152.
- JAILLOUX, J. M.; NAIT-ALI, K. L.; FREITAG, N. **Exhaustive long-term study on hydrolysis of high-tenacity polyester - 10 years results.** 4th European Geosynthetic Conference. Edinburgh: UK. 2008. p. 6.
- JIN, Y. C.; JEON, H.-Y. **Jin, Y. C.; Jeon, H-Y. (2014). Analysis of Creep Deformation Behavior of Geogrids by Limited Creep Strain and Rupture.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: Alemanha. 2014. p. 4.
- JOHN, N. W. M. **Geotextiles.** Blackie. Chapman and Hall: New York. 1987. p. 347.
- JOHN, N. W. M. **Geotextiles.** Blackie. Chapman and Hall. New York: USA. 1987. p. 347.

- JONES, C. J. F. P.; CLARKE, D. **The residual strength of geosynthetic reinforcement subjected to accelerated creep testing and simulated seismic events.** Geotextiles and Geomembranes. 25: 3. 2007. p. 155-169.
- JONGELING, T. H. G.; RÖVEKAMP, N. H. **Storm surge barrier Ramspol.** Proceedings of XXVIII. Graz, Austria: IAHR Congress. 1999. p. 22-27.
- KAMIJI, T. S. M. M. **Fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo. São Paulo: SP. 2006. p. 134.
- KARADEMIR, T.; FROST, J. D. **Micro-scale tensile properties of single geotextile polypropylene filaments at elevated temperatures.** Geotextiles and Geomembranes. 42: 3. 2014. p. 201-213.
- KAZIMIEROWICZ, K. **Simple analysis of deformation of sandsausages.** Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Hydraulic Applications and Related Research. Southeast Asia Chapter: Singapore. 1994. p. 775-778.
- KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K. **Stability of geosynthetic tubes used to flood protection.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: Alemanha. 2014. p. 7.
- KENDALL, P. M. et al. **Large-Scale Controlled Testing of Geotextile Puncture Resistance for Rock Impact.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: Alemanha. 2014. p. 7.
- KIM, H. et al. **Use of an apron to stabilize geomembrane tubes for fighting floods.** Geotextiles and Geomembranes. 22: 4. 2004. p. 239-254.
- KIM, H.; WON, M.; JAMIN, J. **Finite-Element Analysis on the Stability of Geotextile Tube-Reinforced Embankments under Scouring.** International Journal of Geomechanics. 15: 2. 2014. p. 10.
- KOERNER, R. M. et al. **Ten year creep puncture study of HDPE geomembranes protected by needle-punched nonwoven geotextiles.** Geotextiles and Geomembranes. 28: 6. 2010. p. 503-513.

- KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M. **Geotextile tube assessment using a hanging bag test**. *Geotextiles and Geomembranes*. 24: 2. 2006. p. 129-137.
- KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M. **Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles**. *Geotextiles and Geomembranes*. 29: 3. 2011. p. 360-362.
- KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice-Hall: Fourth edition. 1998. p. 76.
- KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. Xlibris Corporation. Lexington: USA. 2012. p. 914.
- KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 761p**. 6Th Edition, Volume 1. Upper Saddle River, New Jersey: Xlibris Corporation. 2012. p. 761.
- KOERNER, R. M.; BOVE, J. A.; MARTIN, J. P. **Water and air transmissivity of geotextiles**. *Geotextiles and Geomembranes*. 1: 1. 1984. p. 57-73.
- KOERNER, R. M.; LORD, A. E.; HALSE, Y. H. **Long-term durability and aging of geotextiles**. *Geotextiles and Geomembranes*. 7: 1. 1988. p. 147-158.
- KOERNER, R. M.; WILSON-FAHMY, R. F.; NAREJO, D. **Puncture protection of geomembranes. Part III: Examples**. *Geosynthetics International*. 3: 5. 1996. p. 655-675.
- KOFFLER, A. et al. **Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction**. *Journal of coastal conservation*. Netherlands: Springer. 2008. p. 11-17.
- KOFFLER, A. et al. **Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction**. *Journal of coastal conservation*. 12: 1. 2008. p. 11-17.
- KONGKITKUL, W.; TATSUOKA, F.; HIRAKAWA, D. **Creep rupture curve for simultaneous creep deformation and degradation of geosynthetic reinforcement**. *Geosynthetics International*. 14: 4. 2007. p. 189-200.

- KUNZ, N.; HEINBAUM, M.; KAYSER, J. **Experience from the Installation on Geotextile Filters at Waterways**. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlim: Alemanha. 2014. p. 9.
- KWON, H. J. et al. **One-dimensional TiO<sub>2</sub> nanostructures with improved UV-blocking properties**. Materials Letters. 93: 1. 2013. p. 175-178.
- LAWSON, C. R. **Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering**. Geosynthetics International. 15: 6. 2008. p. 384-427.
- LEE, E. C.; DOUGLAS, R. S. **Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia**. Geotextiles and Geomembranes. 30: 1. 2012. p. 8-15.
- LEE, K. M.; MANJUNATH, V. R. **Soil-geotextile interface friction by direct shear tests**. Canadian Geotechnical Journal. 37: 1. 2000. p. 238-252.
- LEE, K. W. et al. **The Evaluation of Creep Reduction Factor for Geosynthetic Strip by Conventional Creep Test and Stepped Isothermal Method**. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlim: Alemanha. 2014a. p. 8.
- LEE, K. W. et al. **Dinamic Flow Rate Test on Drainage Geocomposites for Railway Applications**. 10th International Conference on Geosynthetic. Berlim: Alemanha. 2014b. p. 8.
- LEFLAIVE, E.; PAUTE, J. L.; SEGOUIN, M. **La mesure des caracteristiques de traction en vue des applications pratiques**. Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas: Califórnia. 1982. p. 733-738.
- LESHCHINSKY, D. **Issues in geosynthetic-reinforced soil**. International Symposium Earth Reinforcement Practice. Balkema: Rotterdam. 1993. p. 871-897.
- LESHCHINSKY, D. et al. **Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects**. Journal of geotechnical engineering. 122: 8. 1996. p. 682-690.

- LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, O. **GeoCoPS (2.0)**: Supplemental Notes. ADAMA Engineering, Delaware: USA. 1996. p. 24.
- LIMA, F. S. et al. **Avaliação do Comportamento à Tração de Geotêxteis Nãotecidos Submetidos à Radiação Ultravioleta**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia: GO. 2014. p. 5.
- LIU, G. S. **Design criteria of sand-sausages for beach defenses**. International Association for Hydraulic Research. New Delhi: India. 1981. p. 123-131.
- LIU, G. S.; SILVESTER, R. **Sand sausages for beach defence work**. Sixth Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference. Adelaide, Australia: [s.n.]. 1977. p. 340-343.
- LODI, P. C. **Aspectos de Degradação de Geomembranas Poliméricas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e Poli Cloreto de Vinila (PVC)**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo - USP. São Carlos: SP. 2003. p. 284.
- LODI, P. C.; BUENO, B. C.; ZORNBERG, J. **Degradação ultra violeta de geomembranas poliméricas**. VI Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos. Recife: REGEO. 2007. p. 6.
- LODI, P. C.; BUENO, B. S. **Degradation of HDPE and PVC geomembranes exposed to heat**. 3rd European Geosynthetics Conference. Munich: Germany. 2004. p. 729-732.
- LODI, P. C.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. **Avaliação da degradação de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila)(PVC) utilizando análise termogravimétrica**. Revista Iberoamericana de Polímeros. 10: 2. 2009. p. 110-118.
- LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. D. S. **Degradação de geomembranas de polietileno de alta densidade (HDPE) após exposição à intempérie e lixívia**. Revista Iberoamericana de Polímeros. 11: 3. 2010. p. 145-158.

- MAIA, P. C. A. **Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos**. Tese de Doutorado, Departamento de Eng. Civil da PUCRio. Rio de Janeiro: RJ. 2001. p. 336.
- MAIA, P. C. A. et al. **Equipamento para estudo da alterabilidade de geossintéticos**. I Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região centro oeste - Geocentro. Goiânia: GO. 2009. p. 10.
- MAIA, P. C. A.; SALLES, R. O. **Estudo Experimental da Durabilidade de Rochas Ornamentais Através de Procedimentos Especiais de Laboratório**. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba: PR. 2006. p. 6.
- MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S. **Alterabilidade de Rochas Basálticas - Petrografia e Caracterização Física**. Soil and Rocks. 25: 3. 2002. p. 207-225.
- MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S. **Alterabilidade de Rochas Basálticas - Caracterização Mecânica**. Soil and Rocks. 26: 3. 2003. p. 205-215.
- MALÍK, J. **Some problems connected with 2D modeling of geosynthetic tubes**. Nonlinear Analysis: Real World Applications. 10: 2. 2009. p. 810-823.
- MARCOTTE, M.; DENIS, R.; BLOND, E. **Design Algorithm for the Puncture Resistance of PVC Geomembranes for Heap Leach Pads**. Proceedings of the Second Middle East Geosynthetics Conference. Dubai: Emirados Árabes Unidos. 2009. p. 7.
- MARQUES, A. R. et al. **Effects of the climatic conditions of the southeastern Brazil on degradation the fibers of coir-geotextile**: Evaluation of mechanical and structural properties. Geotextiles and Geomembranes. 42: 1. 2014. p. 76-82.
- MASSIMINO, B. M.; FRANÇA, F. A. N.; AVESANI, F. P. B. **Ensaio de tração em geossintéticos realizados com equipamento não convencional**. XI

Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador: Bahia. 2014. p. 7.

MATHEUS, E. **Efeitos do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintéticos**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília: DF. 2002. p. 284.

MATHEUS, E.; PALMEIRA, E. M.; AGNELLI, J. A. M. **Degradação de Alguns Geossintéticos por Radiação Ultravioleta e Variação de Temperatura**. Solos e Rochas. 27: 2. 2004. p. 177-188.

MONTEZ, F. T. **Especificação de Geotêxteis em Projetos - Situação Brasileira e Internacional**. Geossintéticos'95. Anais do II Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos: São Paulo. 1995. p. 237-244.

MOUNES, S. M. et al. **Evaluation of permanent deformation of geogrid reinforced asphalt concrete using dynamic creep test**. Geotextiles and Geomembranes. 44: 1. 2016. p. 109-116.

MUELLER, W. et al. **Comparison of the oxidative resistance of various polyolefin geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes. 21: 5. 2003. p. 289-315.

MÜLLER, W. **On the determination of the chemical reduction factor for PET geogrids**. Geotextiles and Geomembranes. 42: 2. 2014. p. 98-110.

MÜLLER, W. W. **On the determination of the chemical reduction factor for PET geogrids**. Geotextiles and Geomembranes. 42: 2. 2014. p. 98-110.

MÜLLER, W. W.; SAATHOFF, F. **Geosynthetics in geoenvironmental engineering**. Science and Technology of Advanced Materials. 16: 3. 2015. p. 20.

MÜLLER-ROCHHOLZ, J. et al. **Assessment of the alkaline hydrolysis of PET**. 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: UK. 2008. p. 6.

MURAKAMI, N.; KOGA, N. **In situ photoacoustic FTIR studies on photocatalytic oxidation of 2-propanol over titanium (IV) oxide**. Catalysis Communications. 83: 1. 2016. p. 1-4.

- MURPHY, V. P.; KOERNER, R. M. **CBR Strength (Puncture) of Geosynthetics**. Geotechnical Testing Journal. 11: 3. 1988. p. 167-172.
- NAREJO, D.; KOERNER, R. M.; WILSON-FAHMY, R. F. **Puncture protection of geomembranes Part II: Experimental**. Geosynthetics International. 3: 5. 1996. p. 629-653.
- NEVES, L. D. et al. **Estudo Experimental das Erosões Localizadas Junto a Geossistemas de Confinamento de Areias**. VI Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. FEUP: ISBN 978-989-95557-5-4. 2011. p. 172-179.
- NGUYEN, C. T.; VU-KHANH, T.; LARA, J. **Puncture characterization of rubber membranes**. Theoretical and applied fracture mechanics. 42: 1. 2004. p. 25-33.
- NISHOLD, S. S. P.; SUNDARAVADIVELU, R.; SAHA, N. **Analysis and design of geotube saline embankment**. Advances in Computational and Experimental Marine Hydrodynamics - ACEMH. Madras: Índia. 2014. p. 292-300.
- NISHOLD, S. S. P.; SUNDARAVADIVELU, R.; SAHA, N. **Analysis and Design of Geotube Saline Embankment**. Advances in Computational and Experimental Marine Hydrodynamics - ACEMH. Madris, Índia. 2: 1. 2014. p. 292 -300.
- OH, Y. I.; SHIN, E. C. **Using submerged geotextile tubes in the protection of the E. Korean shore**. Coastal Engineering. 53: 11. 2006. p. 879-895.
- PAULA, A. M.; PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. C. **Efeito da danificação durante a instalação de geossintéticos no seu comportamento ao arranque e à rotura em fluência: ensaios laboratoriais**. XI Congresso Nacional de Geotecnia. Coimbra: Portugal. 2008. p. 319-326.
- PERKINS, S. W. **Constitutive modeling of geosynthetics**. Geotextiles and Geomembranes. 18: 5. 2000. p. 273-292.
- PERRIER, H. **Use of soil-filled synthetic pillows for erosion protection**. Third International Conference on Geotextiles. Vienna, Austria: ASCE. 1986. p. 1115-1119.

- PERRY, E. B.; MYERS, M. **Innovative methods for levee repair**. The REMR Bulletin, U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. 10: 3. 1993. p. 1-6.
- PERRY, E. B.; MYERS, M. **Innovative methods for levee repair**. The REMR Bulletin. 10: 3. 1993. p. 1-6.
- PESSANHA, C. A. et al. **Considerações sobre os Procedimentos de Campo e de Laboratório para Estudo da Degradação de Geossintéticos**. IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Gramado: RS. 2010. p. 9.
- PILARCZYK, K. W.; ZEIDLER, R. B. **Offshore breakwaters and shore evolution control**. Oceanographic Literature Review. 4: 44. 1997. p. 403.
- PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. C. **Hidraulic Properties of a Geosynthetic Composite After Mechanical Damage and Abrasion and their Variability**. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: Alemanha. 2014. p. 8.
- PINTO, V. C. **Estudo da degradação de geotêxteis tecidos**. Dissertação de Mestrado. Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes: RJ. 2006. p. 133.
- PINTO, V. C.; MAIA, P. C. A.; VALINHO, R. F. **Avaliação Qualitativa da Degradação de Diferentes Tipos de Geossintéticos**. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. São Carlos: SP. 2004. p. 6.
- PLAUT, R. H.; STEPHENS, T. C. **Analysis of geotextile tubes containing slurry and consolidated material with frictional interface**. Geotextiles and Geomembranes. 32: 1. 2012. p. 38-43.
- PLAUT, R. H.; SUHERMAN, S. **Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes**. Acta Mechanica. 129: 3-4. 1998. p. 207-218.
- PLAUT, R. H.; SUHERMAN, S. **Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes**. Acta Mechanica. 129: 3. 1998. p. 207-218.

- PRADO, T. S.; GARDONI, M. G. **Prado, T. S., & das Graças Gardoni, M. (2010). Avaliação da Colmatação Biológica de Sistemas de Drenagem com Geotêxtil em Aterros Sanitários.** IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Gramado: RS. 2010. p. 7.
- PRELLWITZ, M. F.; MAIA, P. C. A.; DIAS FILHO, J. L. E. **Influence of drying temperature on punching resistance in geotextile fabrics through wet and dry degradation test.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: Alemanha. 2014. p. 7.
- PUMA, G. L. et al. **Photocatalytic oxidation of multicomponent mixtures of estrogens (estrone (E1), 17 $\beta$ -estradiol (E2), 17 $\alpha$ -ethynylestradiol (EE2) and estriol (E3)) under UVA and UVC radiation: photon absorption, quantum yields and.** Applied Catalysis B: Environmental. 99: 3. 2010. p. 388-397.
- RAM, A. **Fundamentals of Polymer Engineering.** Springer Science & Business Media. New York: Plenum Press. 1997. p. 237.
- RAWAL, A. et al. **A comparison of widewidth tensile strength to its axi-symmetric tensile strength of hybrid needlepunched nonwoven geotextiles.** Geotextiles and Geomembranes. 36: 1. 2013. p. 66-70.
- RAYMOND, G. P. **Railway Rehabilitation Geotextiles.** Geotextiles and Geomembranes. 17: 4. 1999. p. 213-230.
- RESTALL, S. J. et al. **Case studies showing the growth and development of geotextile sand containers: an Australian perspective.** Geotextiles and Geomembranes. 20: 5. 2002. p. 321-342.
- RICHAUD, E. et al. **Accelerated ageing of polypropylene geotextiles, the effect of temperature, oxygen pressure and aqueous media on fibers – Methodological aspects.** Geotextiles and Geomembranes. 26: 1. 2008. p. 71-81.
- RICHAUD, E.; FARCAS, F.; BENNETON, J. P. **Influence of temperature, high oxygen pressure in aqueous media on accelerated ageing of**

- polypropylene**. 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama : Japan. 2006. p. 1547-1550.
- RICHGELS, C.; AYERS, M.; URRUTIA, J. **Estimation of Geographic Ultraviolet Radiation Levels and Impact on Geosynthetic Cover Systems**. Geosynthetics Conference. Portland: Oregon. 2015. p. 10.
- RIMOLDI, P.; KOERNER, R.; KOERNER, G. **Dynamic flow rate tests on drainage geocomposites for railway applications**. 10th International Conference on Geosynthetics. Berlim: Alemanha. 2014. p. 8.
- RODRIGUES, D. V. et al. **Durabilidade de peças cerâmicas vermelhas com adição de rejeito de rochas ornamental isenta de granalha**. Cerâmica. 58: 437. 2012. p. 286-293.
- ROWE, R. K. **Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications**. Soils and Rocks. 30: 1. 2007. p. 3-30.
- ROWE, R. K. et al. **GCL hydration under simulated daily thermal cycles**. Geosynthetics International. 18: 4. 2011. p. 196-205.
- ROWE, R. K.; RIMAL, S. **Ageing and long-term performance of geomembrane liners**. 1st Pan-American Regional Conference on Geosynthetics - GeoAmericas 2008. Cancun: Mexico. 2008. p. 425-434.
- ROWE, R. K.; RIMAL, S.; SANGAM, H. **Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures**. Geotextiles and Geomembranes. 27: 2. 2009. p. 137-151.
- SAATHOFF, F.; OUMERACI, H.; RESTALL, S. **Australian and German experiences on the use of geotextile containers**. Geotextiles and Geomembranes. 25: 4. 2007. p. 251-263.
- SAHA, P. et al. **Durability of transesterified jute geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes. 35: 1. 2012. p. 69-75.

- SALLES, R. O. **Durabilidade de geossintéticos em equipamento de degradação em laboratório**. Dissertação de Mestrado - Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes: RJ. 2006. p. 121.
- SALLES, R. O. **Comportamento geomecânico e de alterabilidade da rocha gnáissica da obra do ahe simplício**. Tese de Doutorado, Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro: RJ. 2013. p. 177.
- SALLES, R. O. et al. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Geotêxtil Após Degradação no Campo e no Laboratório**. II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. Nova Friburgo: RJ. 2006. p. 6.
- SALLES, R. O.; MAIA, P. C. A. **Avaliação Experimental da Alterabilidade de Rochas Ornamentais do Norte do Estado do Rio de Janeiro**. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. São Carlos: SP. 2004. p. 6.
- SALLES, R. O.; MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. S. F. J. **Degradação de Geotêxteis Tecidos após Exposição no Campo e no Laboratório**. V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos. Recife: PE. 2007. p. 7.
- SALLES, R. O.; MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. S. F. J. **Efeito da Degradação na Rigidez do Geotêxtil Tecido Após Exposição no Campo e no Laboratório**. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Búzios: RJ. 2008. p. 7.
- SARTI, G.; LARSEN, J. **Underwater filling of Longard tubes**. Coastal Structures' 83. Arlington, Virginia, United States: ASCE. 1983. p. 610-618.
- SEHGAL , C. K. **Design guidelines for spillway gates**. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 122: 3. 1996. p. 155-165.
- SHIN, E. C.; OH, Y. I. **Analysis of geotextile tube behaviour by large-scale field model tests**. Geosynthetics International. 10: 4. 2003. p. 134-141.

- SHIN, E. C.; OH, Y. I. **Consolidation process of geotextile tube filled with finegrained materials**. International Society of Offshore and Polar Engineers. 14: 2. 2004. p. 9.
- SHIN, E. C.; OH, Y. I. **Coastal erosion prevention by geotextile tube technology**. Geotextiles and Geomembranes. 25: 4. 2007. p. 264-277.
- SILVA, E. M.; SANTOS, E. C. G. **Fatores de Redução de Resistência de Geotêxtil Tecido Devido a Danos Mecânicos Causados por Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)**. Anais da Mostra de Extensão. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada. 2: 1. 2014. p. 420-434.
- SILVESTER, R. **Use of grout-filled sausages in coastal structures**. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 112: 1. 1986. p. 95-114.
- SUITS, L. D.; HSUAN, Y. G. **Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer**. Geotextiles and Geomembranes. 21: 2. 2003. p. 111-122.
- SULLIVAN, C. J.; COOPER, C. F. **Polyester weatherability: coupling frontier molecular orbital calculations of oxidative stability with accelerated testing**. Journal of coatings technology. 67: 847. 1995. p. 53-62.
- SZYSZKOWSKI, W.; GLOCKNER, P. G. **On the statics of large-scale cylindrical floating membrane containers**. International journal of non-linear mechanics. 22: 4. 1987. p. 275-282.
- TAFFE JUNIOR, E. J.; VIDAL, D.; RODRIGUES, R. M. **Ensaio de puncionamento considerando condições de campo para análise do reforço de fundações**. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo: ABMS. 2002. p. 7.
- TAM, P. W. M. **Use of rubber dams for flood mitigation in Hong Kong**. Journal of irrigation and drainage engineering. 123: 2. 1997. p. 73-78.
- TANG, X. W. et al. **Prediction of pore size characteristics of woven slit-film geotextiles subjected to tensile strains**. Geotextiles and Geomembranes. 38: 1. 2013. p. 43-50.

- THIEL, R. et al. **Laboratory measurements of GCL shrinkage under cyclic changes in temperature and hydration conditions.** In. 8th International Conference on Geosynthetics. Yokohama: Japan. 2006. p. 21-44.
- THOMAS, R. W.; MAUBEUGE, K. V. **Thermal oxidation of a polypropylene geotextile used in a geosynthetic clay liner.** 4th European Geosynthetics Conference. Edinburgh: UK. 2008. p. 10.
- TOUZE-FOLTZ, N.; FARCAS, F.; BENCHET, R. **Evaluation of the Ageing of Two Bituminous Geomembranes of Different Natures After 15 Years in Service.** Geosynthetics Conference. Portland: Oregon. 2015. p. 10.
- VAN STEEG, P. et al. **Large-scale physical model tests on sand-filled geotextile tubes and containers under wave attack.** 6th International Conference on Coastal Structures. Tokyo: Japan. 2011. p. 13.
- VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** Segunda Edição. São Paulo: Blucher. 2015. p. 570.
- VIDAL, D. M.; RIGHETTI, C. C. **Propriedades Hidráulicas dos Geotexteis.** XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador: Bahia. 1990. p. 10.
- VIDAL, D.; PADILHA, R. **Resistência à Tração não Confinada de Geotêxteis: Análise de Alguns Fatores de Influência.** II Simpósio Brasileiro Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia. São Paulo: São Paulo. 1995. p. 81-89.
- VINK, P.; FONTIJN, H. F. N. **Testing the resistance to oxidation of polypropylene geotextiles at enhanced oxygen pressures.** Geotextiles and Geomembranes. 18: 5. 2000. p. 333-343.
- WATSON, L. T.; SUHERMAN, S.; PLAUT, R. H. **Two-dimensional elastica analysis of equilibrium shapes of single-anchor inflatable dams.** International journal of solids and structures. 36: 9. 1999. p. 1383-1398.
- WILKE, M.; MORGAN, K.; COLONESE, B. **Geosynthetics in coastal and hydraulic engineering - More than 50 years of experience.** Third International

Workshop on Geosynthetics and Modern Material on Coastal Protection and Related Applications. Geosynthetics & Coasts 2015. Mérida, Yucatán: México. 2015b. p. 7.

WILKE, M.; SCHOENHERR, R.; PFEIFER, M. **Pit Lake Bank stabilization by use of geosynthetic tubes**. Third International Workshop on Geosynthetics and Modern Material on Coastal Protection and Related Applications. Geosynthetics & Coasts 2015. Mérida, Yucatán: México. 2015a. p. 6.

WILSON-FAHMY, R. F.; NAREJO, D.; KOERNER, R. M. **Puncture Protection of Geomembranes Part I: Theory**. Geosynthetics International. 3: 5. 1996. p. 605-628.

WU, C. S.; HONG, Y. S.; WANG, R. H. **The influence of uniaxial tensile strain on the pore size and filtration characteristics of geotextiles**. Geotextiles and Geomembranes. 26: 3. 2008. p. 250-262.

XAVIER, G. C. **Resistência, Alterabilidade e Durabilidade de Peças Cerâmicas Vermelhas Incorporadas com Resíduo de Granito**. Tese de doutorado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF. Campos dos Goytacazes: RJ. 2006. p. 202.

XAVIER, G. C. et al. **Análise de processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito**. Cerâmica. 55: 331. 2009. p. 1-10.

YAN, S. W.; CHU, J. **Methods for using natural or synthetic materials for dike construction**. Proceeding International Symposium on Tsunami Reconstruction with Geosynthetics. Pathum Thani: Tailândia. 2005. p. 8-9.

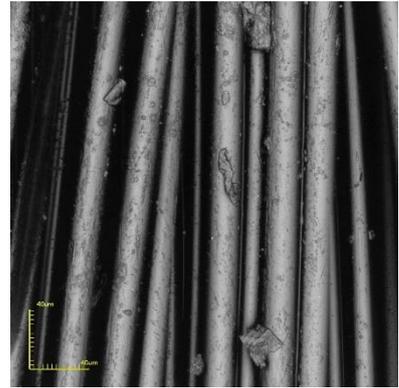
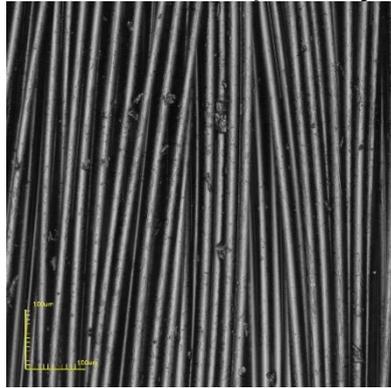
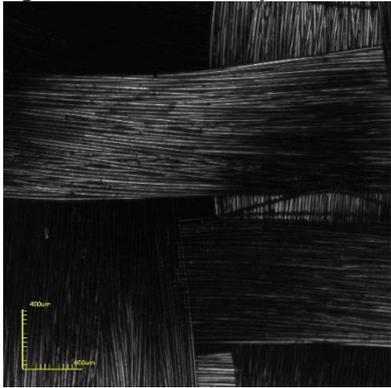
YAN, S. W.; CHU, J. **Construction of an offshore dike using slurry filled geotextile mats**. Geotextiles and Geomembranes. 28: 5. 2010. p. 422-433.

YANG, X.; DING, X. **Prediction of outdoor weathering performance of polypropylene filaments by accelerated weathering tests**. Geotextiles and Geomembranes. 24: 2. 2006. p. 103-109.

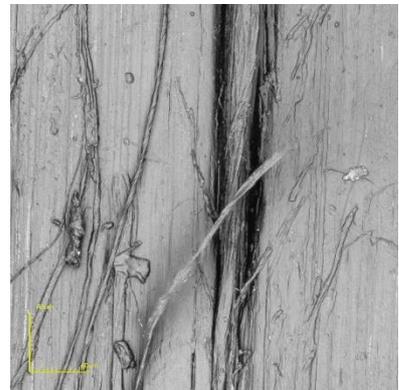
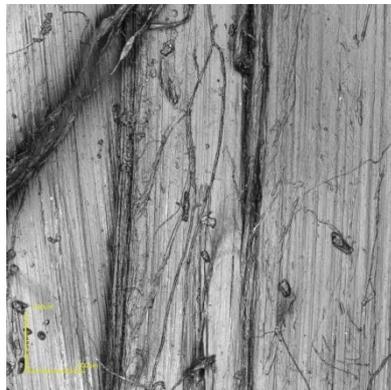
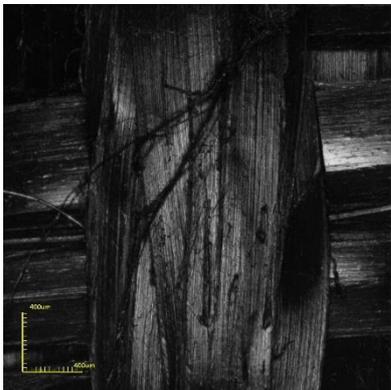
- YEE, T. W. et al. **Geotextile tubes as rockfill replacement for construction of polder dike at Saemangeum, Korea.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlim: Alemanha. 2014. p. 8.
- YEO, S. S.; HSUAN, Y. G. **Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-terephthalate geogrids.** Geotextiles and Geomembranes. 28: 5. 2010. p. 409-421.
- YOSHIMURA, P.; GUIMARÃES, M. G.; VIDAL, D. M. **Some Aspects of the Durability Testing for Geosynthetics Exposed to Climatic Degradation Agents.** 10th International Conference on Geosynthetics. Berlim : Alemanha. 2014. p. 8.
- ZANZINGER, H.; SAATHOFF, F. **Long-term internal shear strength of a reinforced GCL based on shear creep rupture tests.** Geotextiles and Geomembranes. 33: 1. 2012. p. 43-50.
- ZHANG, X. Q.; TAM, P. W.; ZHENG, W. **Construction, operation, and maintenance of rubber dams.** Canadian Journal of Civil Engineering. 29: 3. 2002. p. 409-420.

## ANEXO A - MICROSCOPIAS

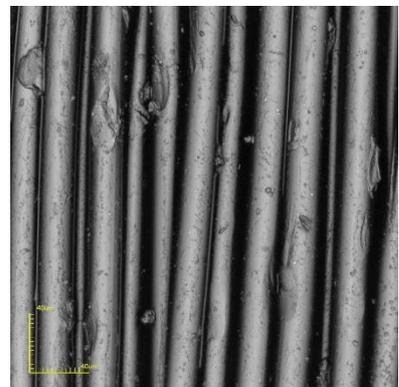
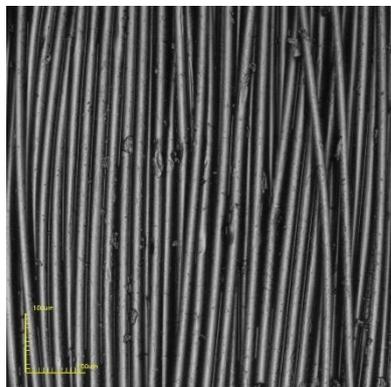
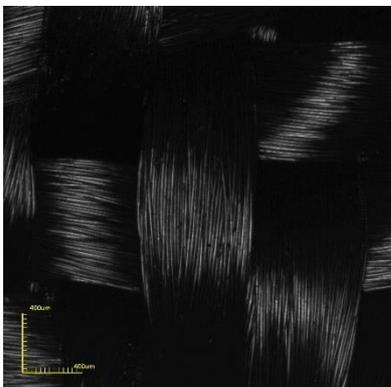
Figura A 1. Microscopia dos Materiais Intactos em aproximações de 5, 20 e 50 vezes



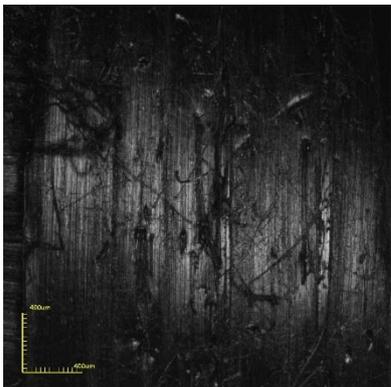
(a) PET340



(b) PP500

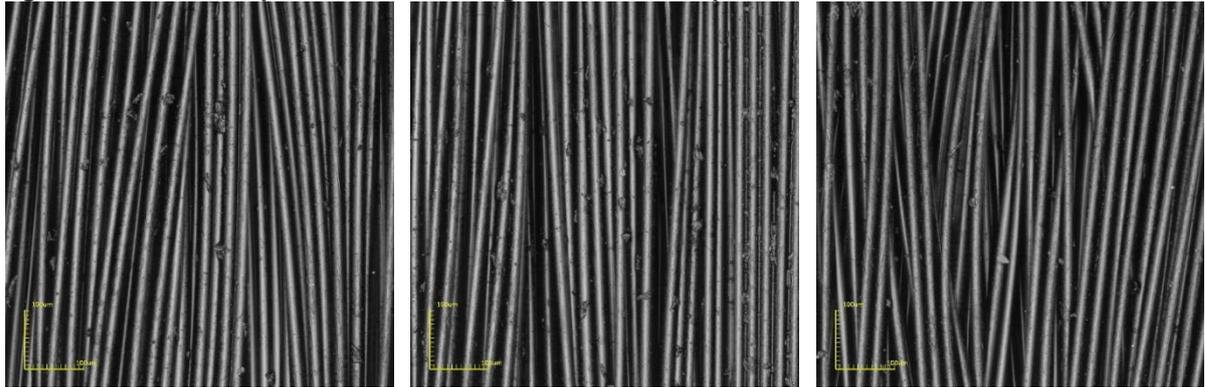


(c) PET740



(d) PP925

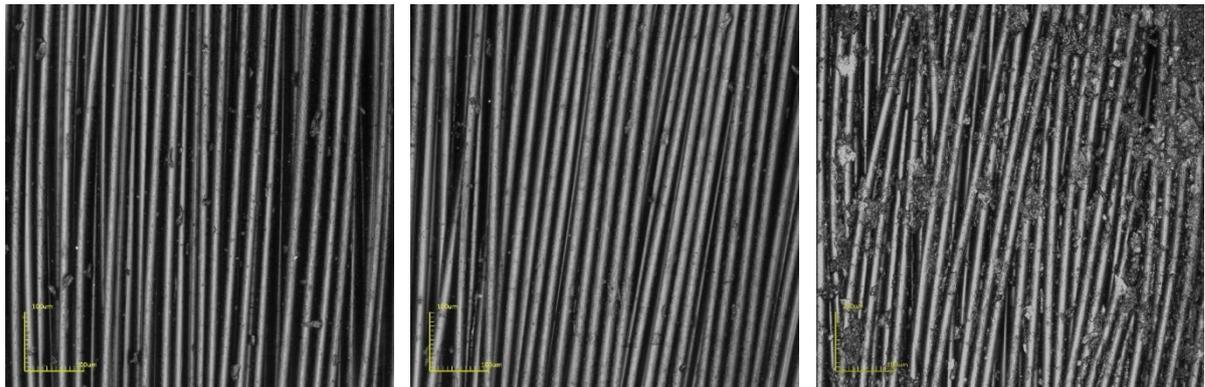
**Figura A 2. Microscopias do PET340 Degradado no Campo**



(a) Intacto

(b) 3 meses ou 2160 horas

(c) 6 meses ou 4320 horas

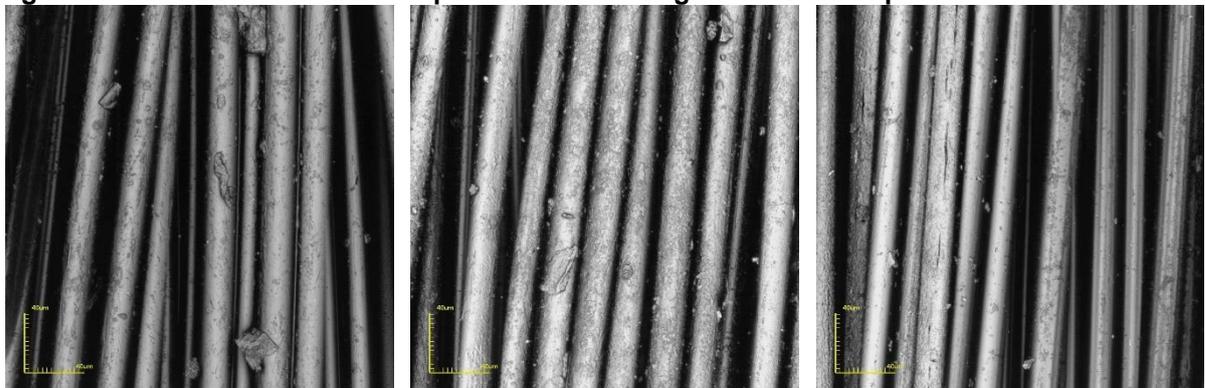


(d) 9 meses ou 6480 horas

(e) 12 meses ou 8640 horas

(f) 24 meses ou 17280 horas

**Figura A 3. Detalhes das Microscopias do PET340 Degradado no Campo**

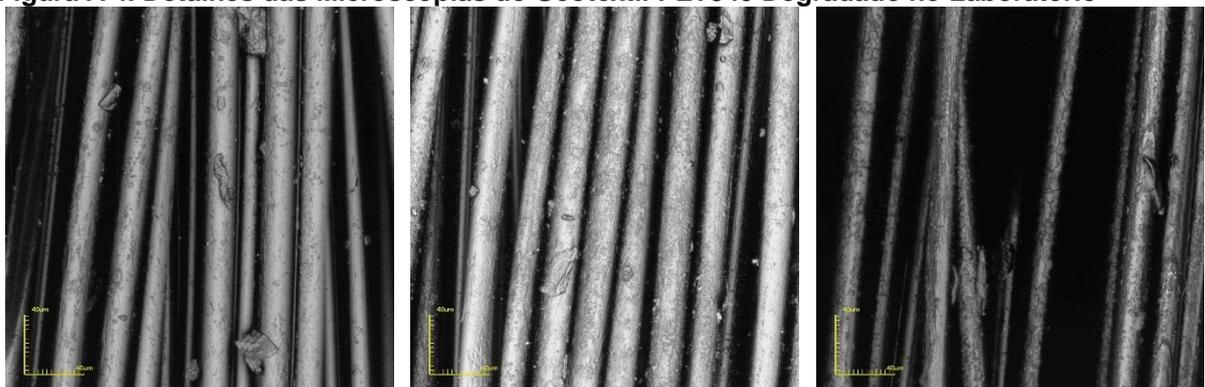


(a) Intacto

(b) 12 meses ou 8640 horas

(c) 24 meses ou 17280 horas

**Figura A 4. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PET340 Degradado no Laboratório**

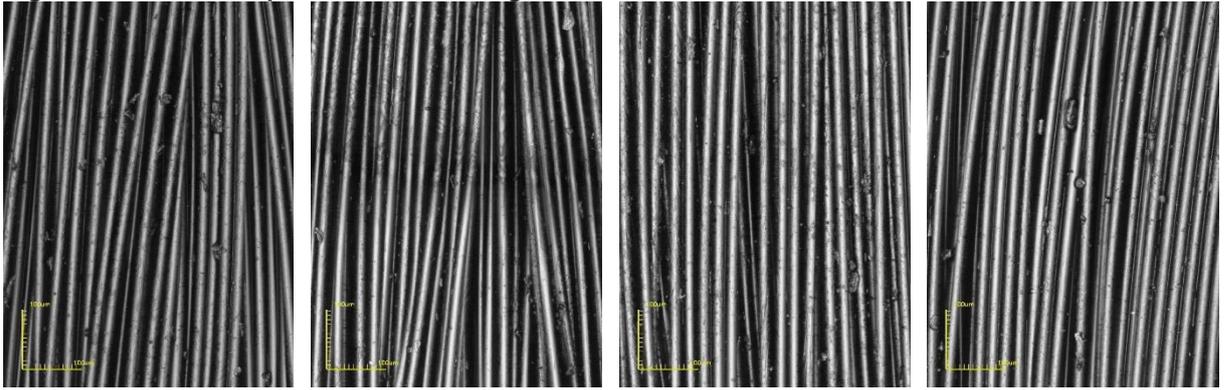


(a) Intacto

(b) 270 ciclos ou 2160 horas

(c) 600 ciclos ou 4800 horas

**Figura A 5. Microscopias do PET340 Degradado no Laboratório**

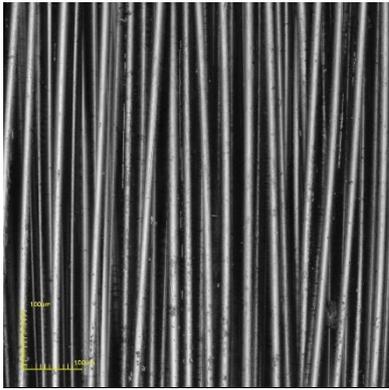


(a) Intacto

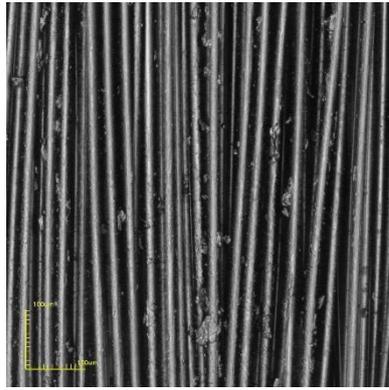
(b) 1 ciclo ou 8 horas

(c) 2 ciclos ou 16 horas

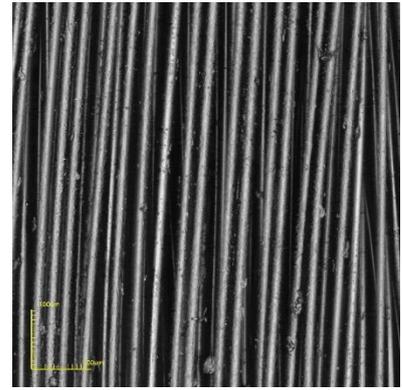
(d) 3 ciclos ou 24 horas



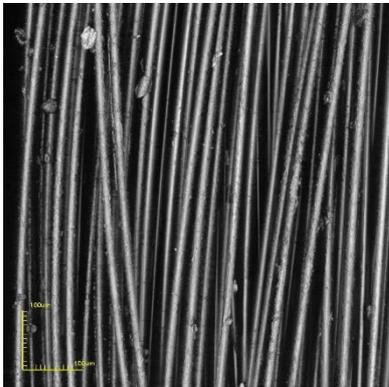
(e) 4 ciclos ou 32 horas



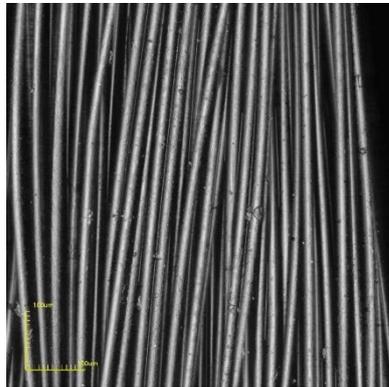
(f) 5 ciclos ou 40 horas



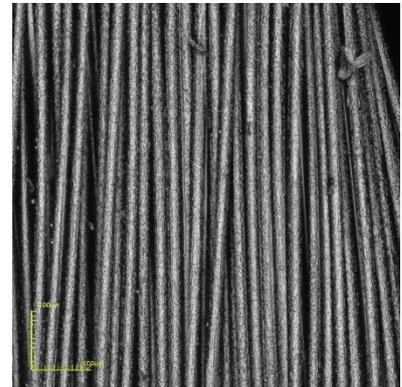
(g) 10 ciclos ou 80 horas



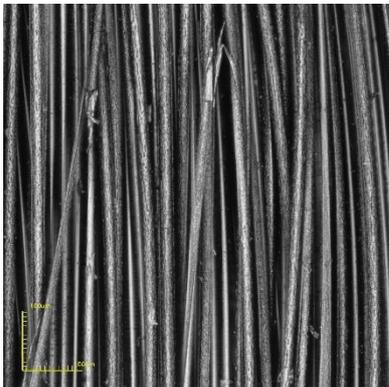
(h) 25 ciclos ou 200 horas



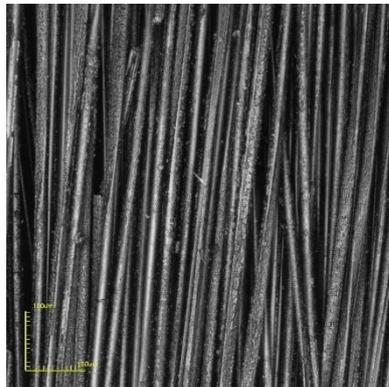
(i) 50 ciclos ou 400 horas



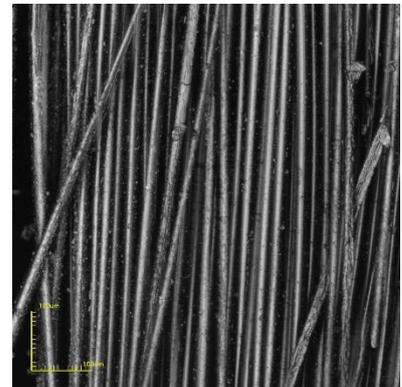
(j) 100 ciclos ou 800 horas



(k) 130 ciclos ou 1040

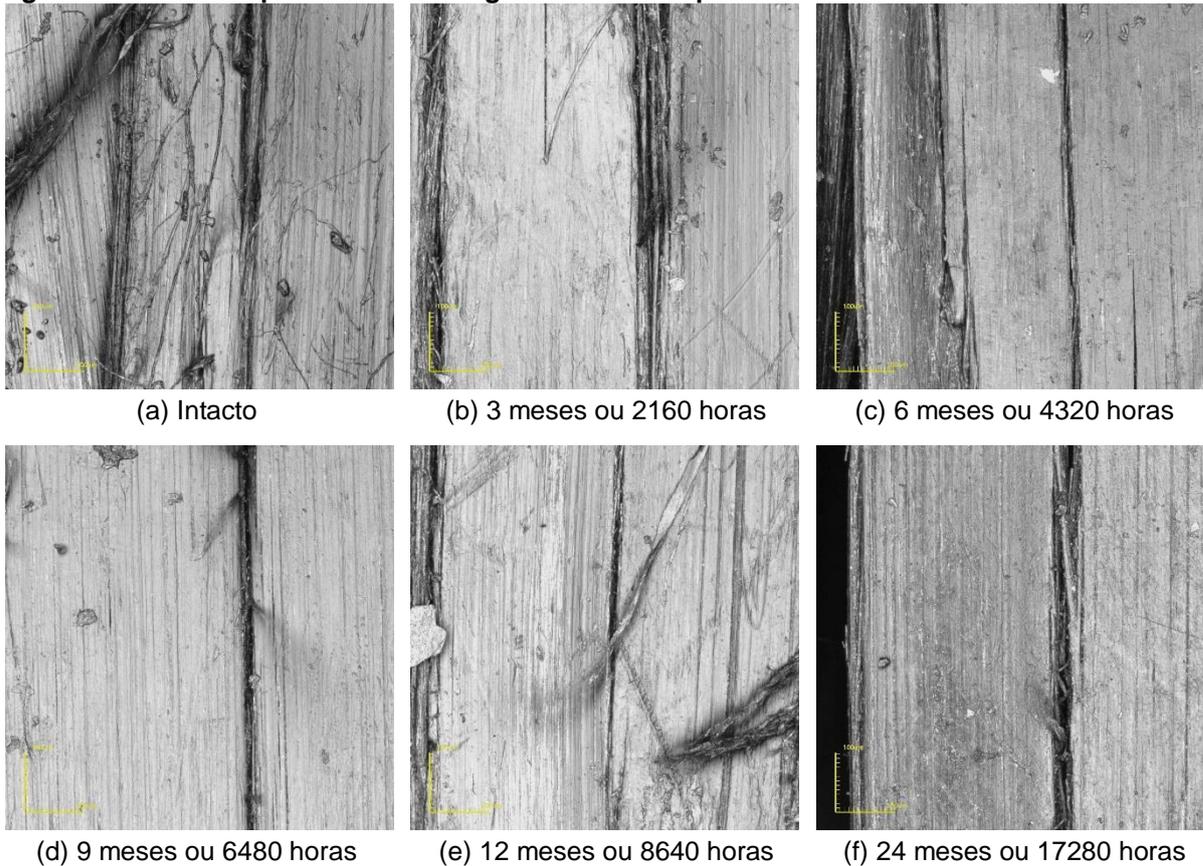


(l) 270 ciclos ou 2160 horas



(m) 600 ciclos ou 4800 horas

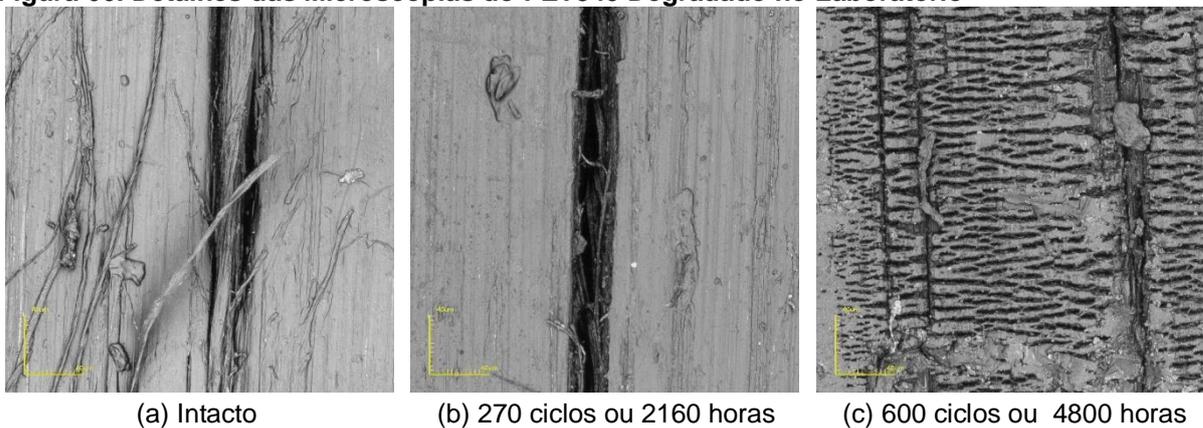
**Figura A 6. Microscopias do PP500 Degradado no Campo**



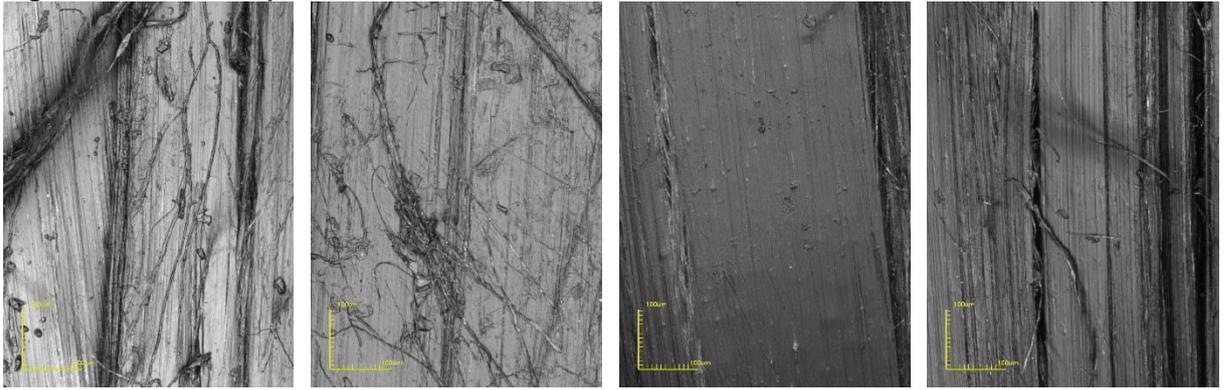
**Figura A 7. Detalhes das Microscopias do Geotêxtil PP500 Degradado no Campo**



**Figura 66. Detalhes das Microscopias do PET340 Degradado no Laboratório**



**Figura A 8. Microscopias do PP500 Degradado no Laboratório**

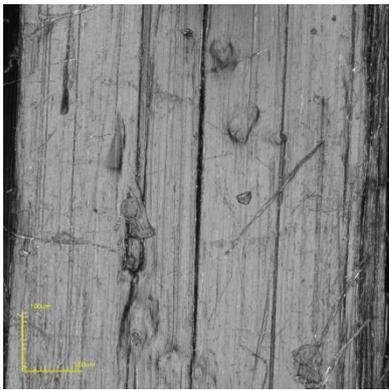


(a) Intacto

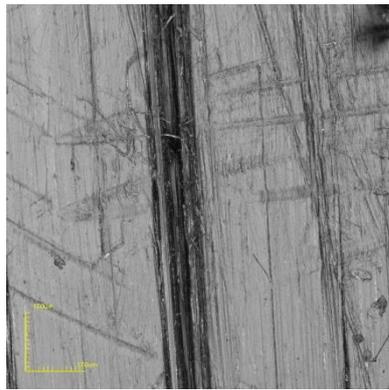
(b) 1 ciclo ou 8 horas

(c) 2 ciclos ou 16 horas

(d) 3 ciclos ou 24 horas



(e) 4 ciclos ou 32 horas



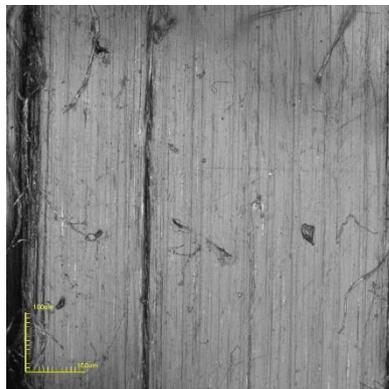
(f) 5 ciclos ou 40 horas



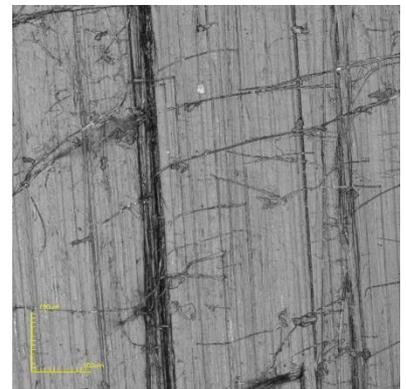
(g) 10 ciclos ou 80 horas



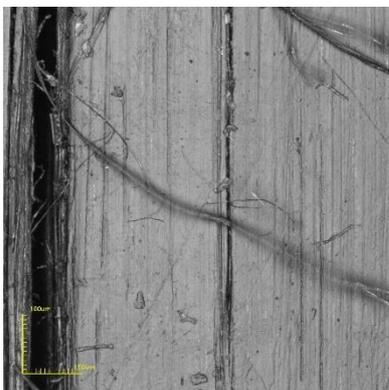
(h) 25 ciclos ou 200 horas



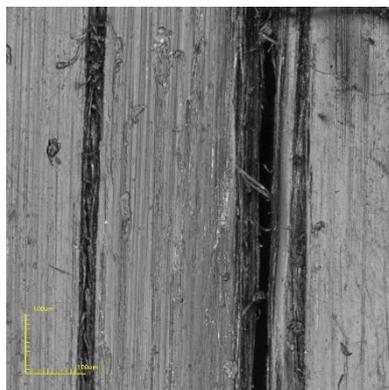
(i) 50 ciclos ou 400 horas



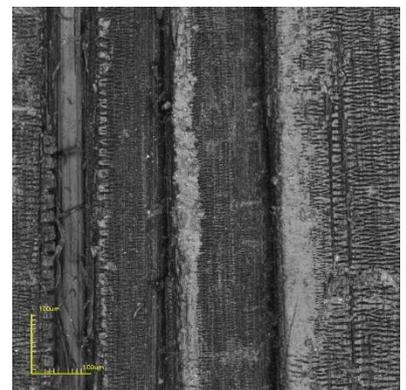
(j) 100 ciclos ou 800 horas



(k) 130 ciclos ou 1040

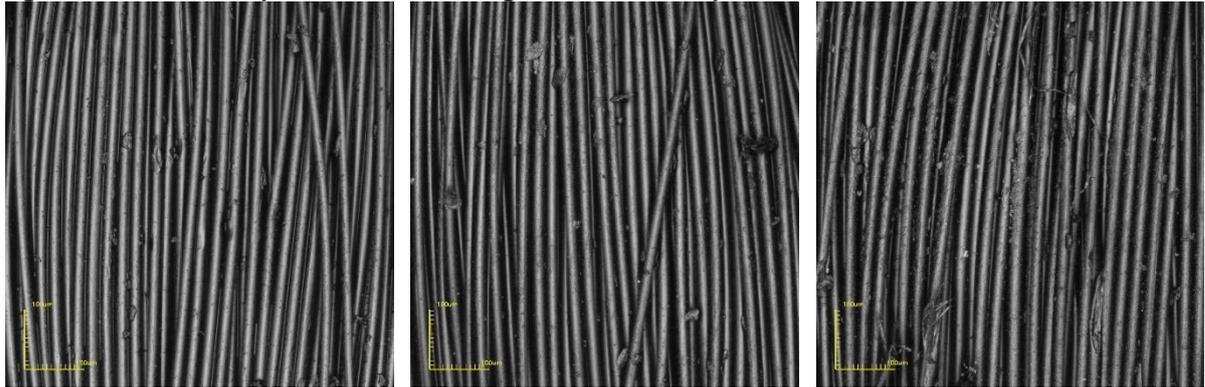


(l) 270 ciclos ou 2160 horas



(m) 600 ciclos ou 4800 horas

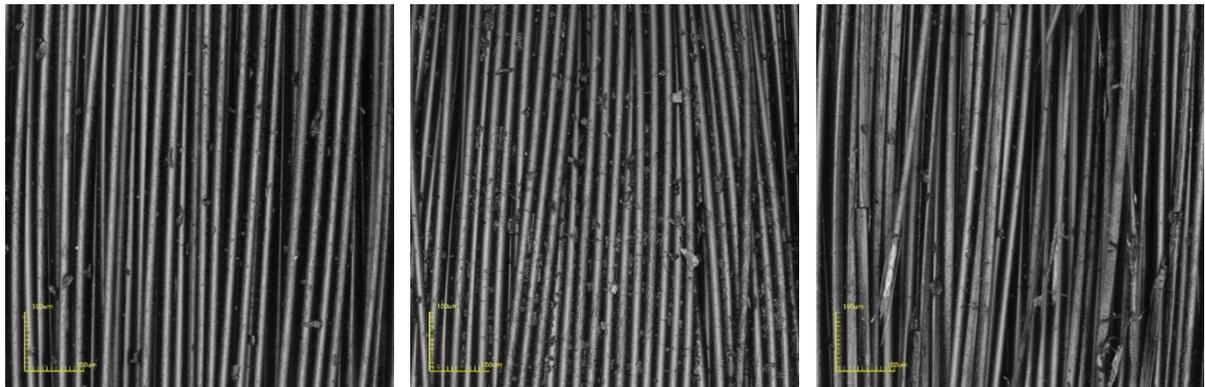
**Figura A 9. Microscopias do PET740 Degradado no Campo**



(a) Intacto

(b) 3 meses ou 2160 horas

(c) 6 meses ou 4320 horas

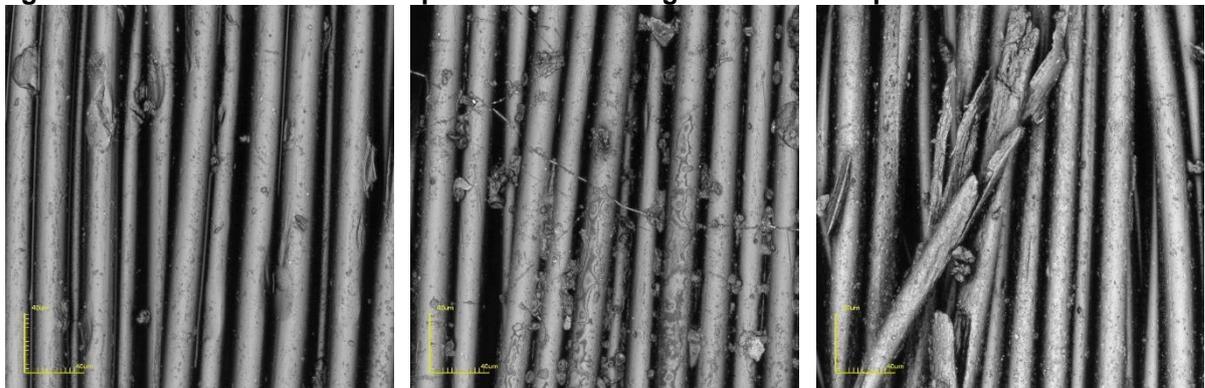


(d) 9 meses ou 6480 horas

(e) 12 meses ou 8640 horas

(f) 24 meses ou 17280 horas

**Figura 67. Detalhes das Microscopias do PET740 Degradado no Campo**

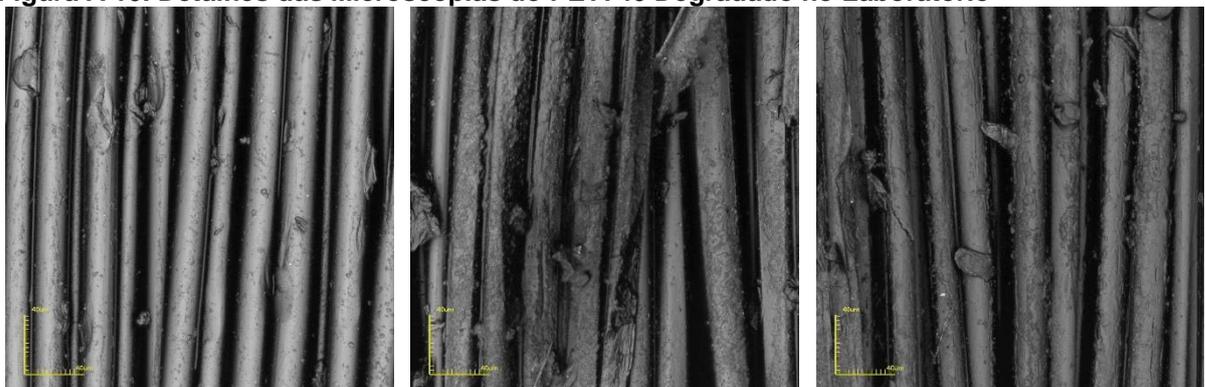


(a) Intacto

(b) 12 meses ou 8640 horas

(c) 24 meses ou 17280 horas

**Figura A 10. Detalhes das Microscopias do PET740 Degradado no Laboratório**

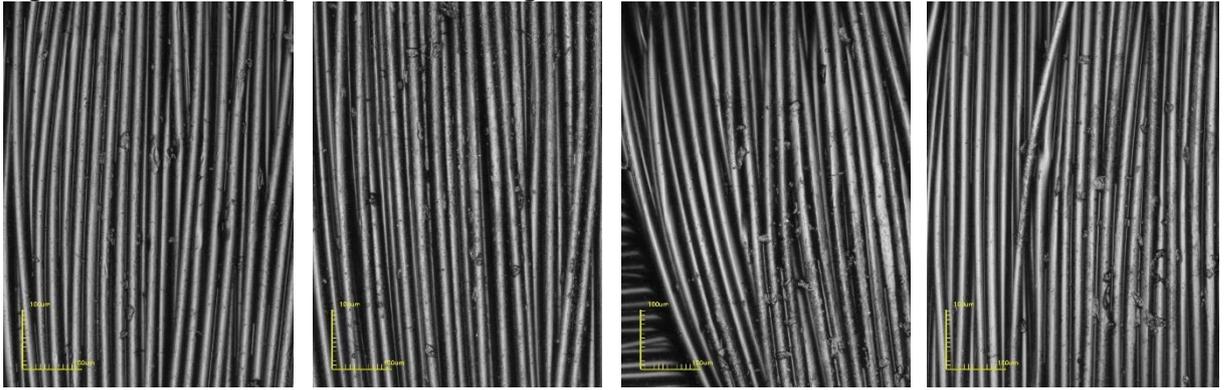


(a) Intacto

(b) 270 ciclos ou 2160 horas

(c) 600 ciclos ou 4800 horas

**Figura A 11. Microscopias do PET740 Degradado no Laboratório**

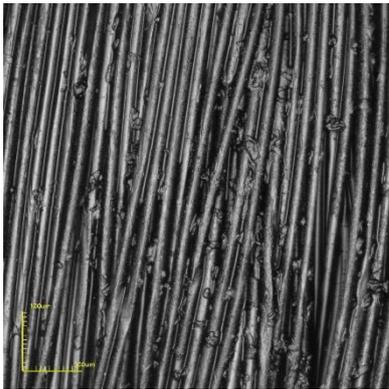


(a) Intacto

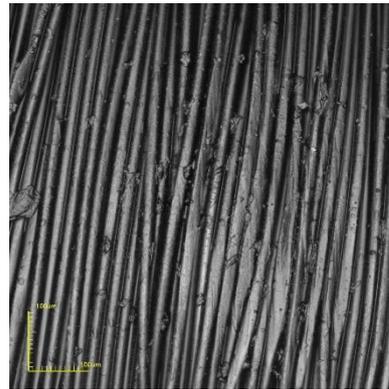
(b) 1 ciclo ou 8 horas

(c) 2 ciclos ou 16 horas

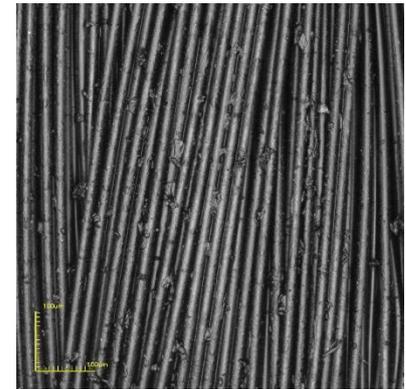
(d) 3 ciclos ou 24 horas



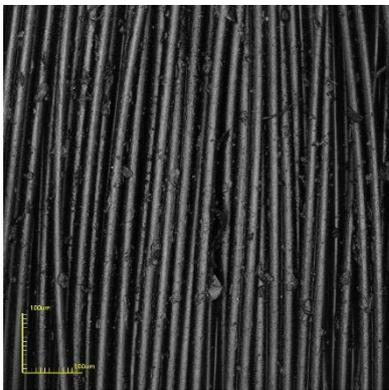
(e) 4 ciclos ou 32 horas



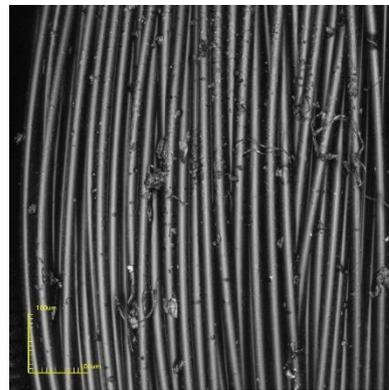
(f) 5 ciclos ou 40 horas



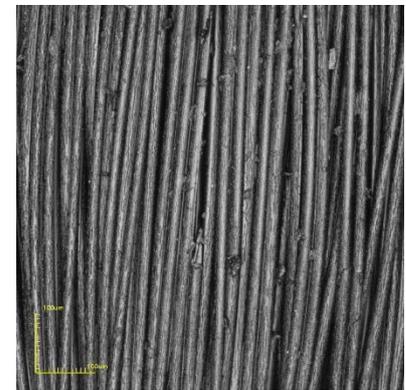
(g) 10 ciclos ou 80 horas



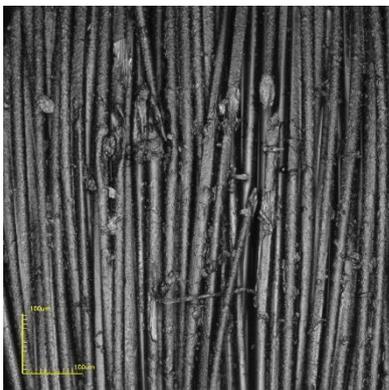
(h) 25 ciclos ou 200 horas



(i) 50 ciclos ou 400 horas



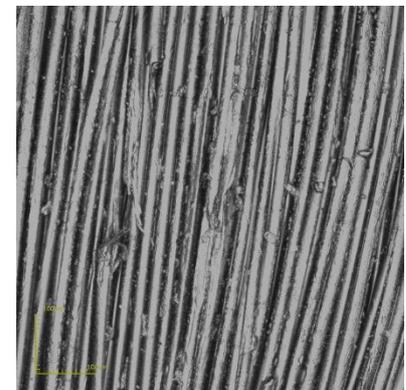
(j) 100 ciclos ou 800 horas



(k) 130 ciclos ou 1040

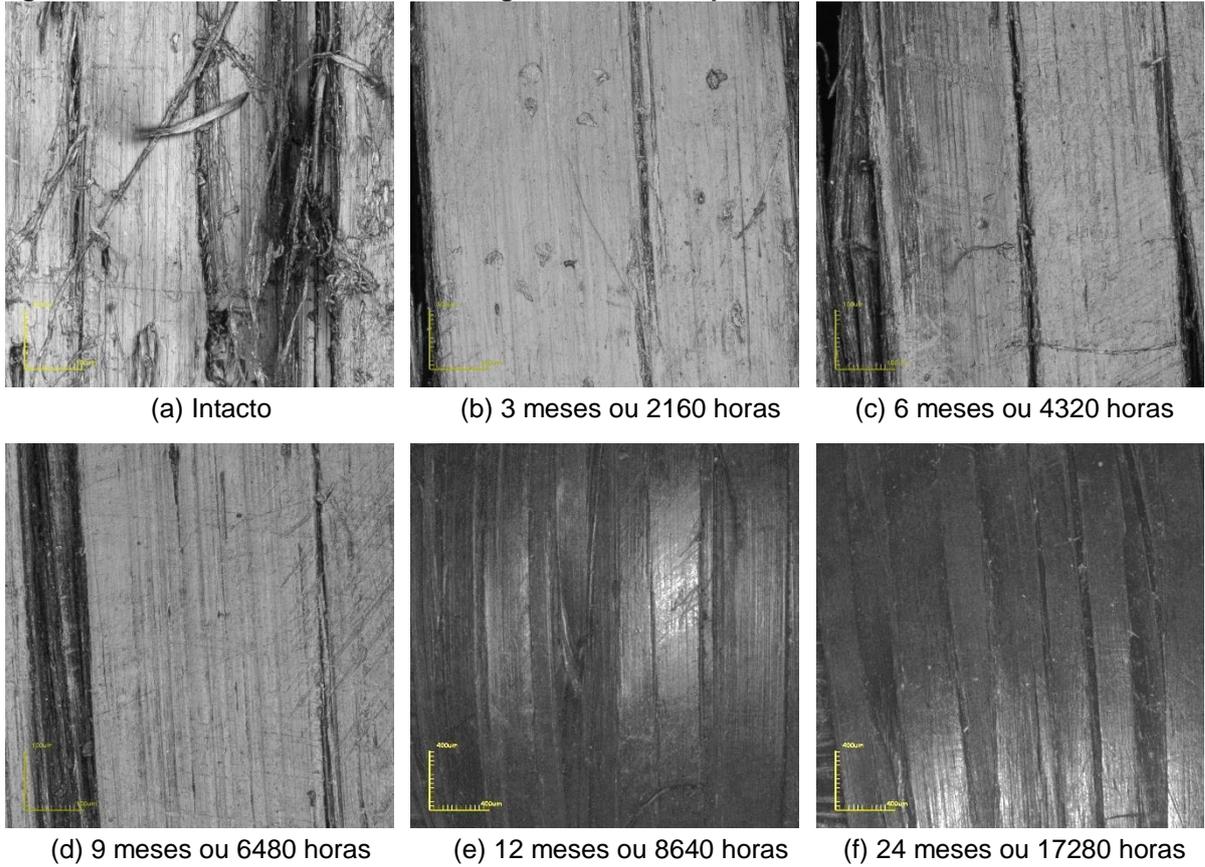


(l) 270 ciclos ou 2160 horas

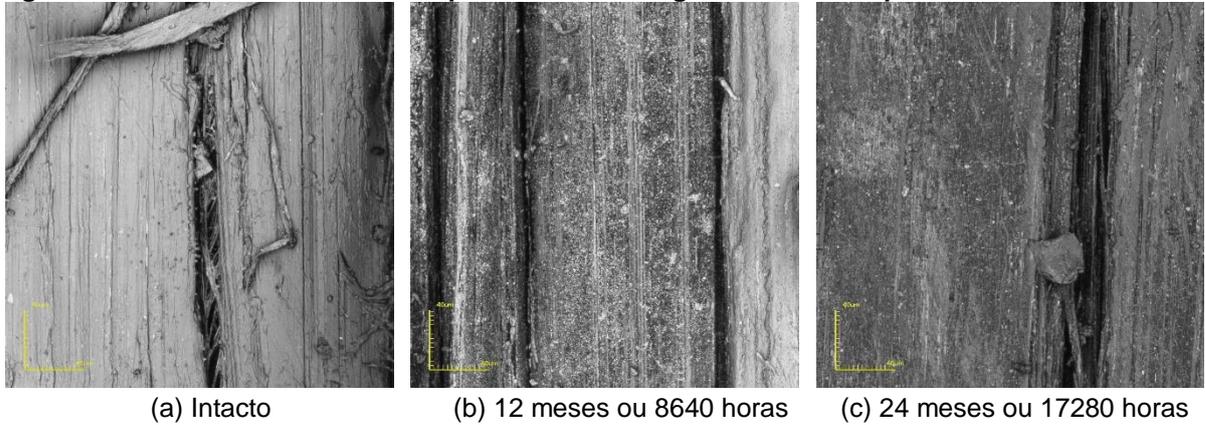


(m) 600 ciclos ou 4800 horas

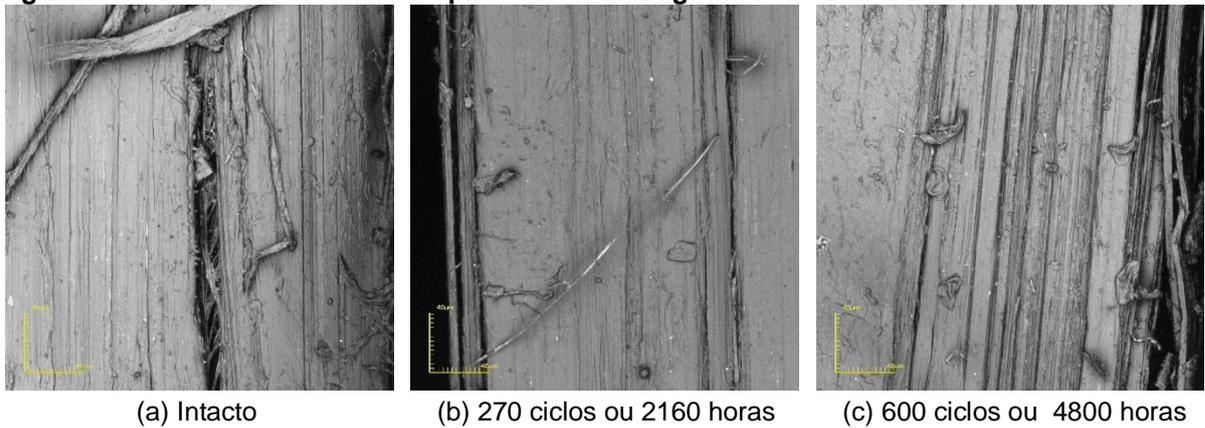
**Figura A 12. Microscopias do PP925 Degradado no Campo**



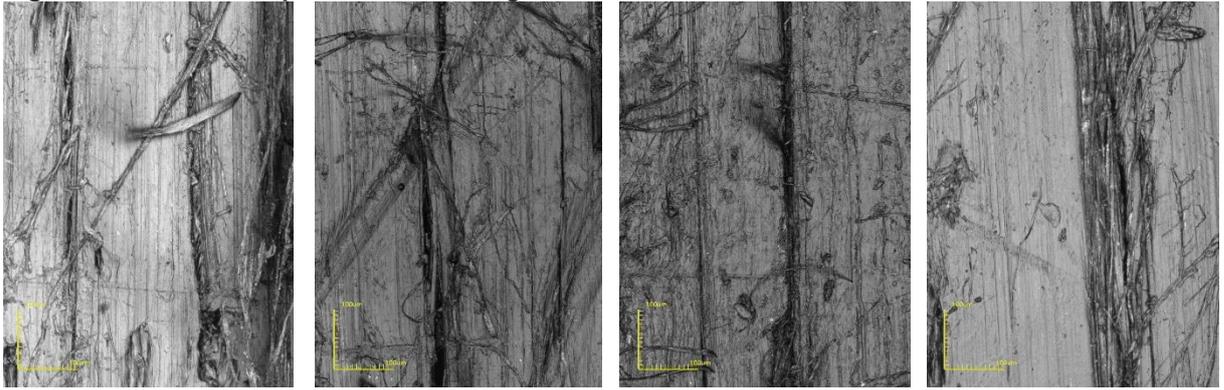
**Figura A 13. Detalhes das Microscopias do PP925 Degradado no Campo**



**Figura A 14. Detalhes das Microscopias do PP925 Degradado no Laboratório**



**Figura A 15. Microscopias do PP925 Degradado no Laboratório**

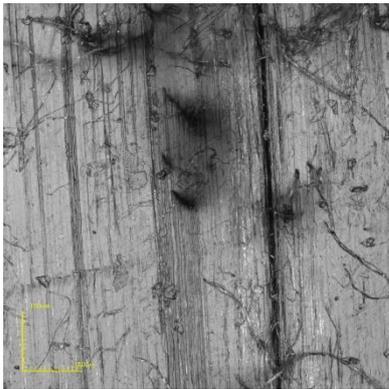


(a) Intacto

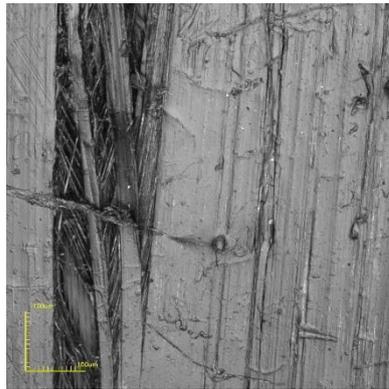
(b) 1 ciclo ou 8 horas

(c) 2 ciclos ou 16 horas

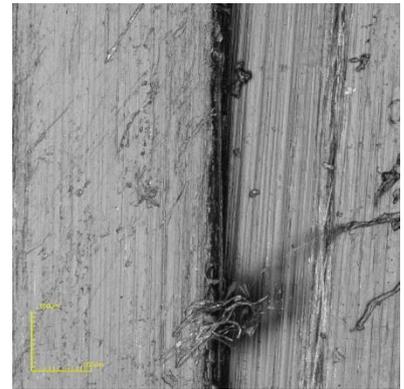
(d) 3 ciclos ou 24 horas



(e) 4 ciclos ou 32 horas



(f) 5 ciclos ou 40 horas



(g) 10 ciclos ou 80 horas



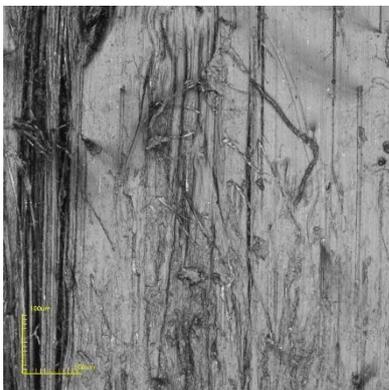
(h) 25 ciclos ou 200 horas



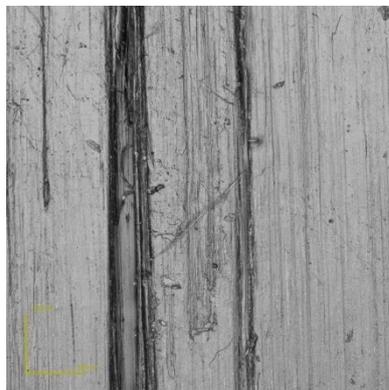
(i) 50 ciclos ou 400 horas



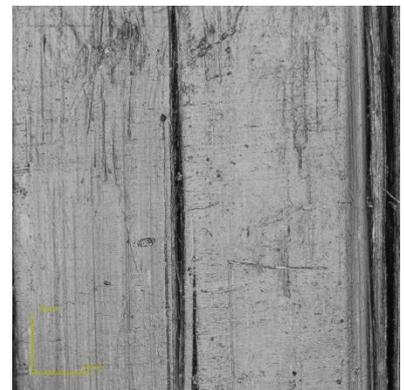
(j) 100 ciclos ou 800 horas



(k) 130 ciclos ou 1040

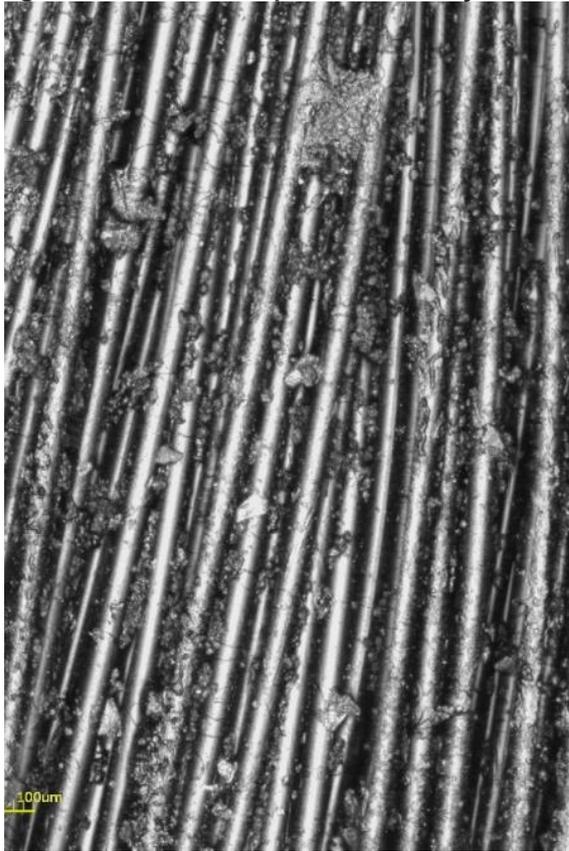


(l) 270 ciclos ou 2160 horas

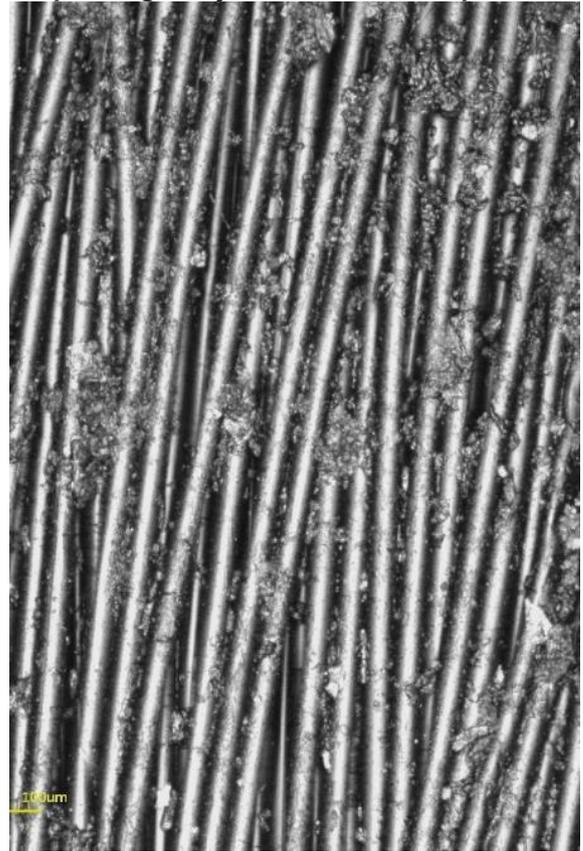


(m) 600 ciclos ou 4800 horas

**Figura A 16. Microscopia da colmatção do PET740 após degradação natural no Campo**

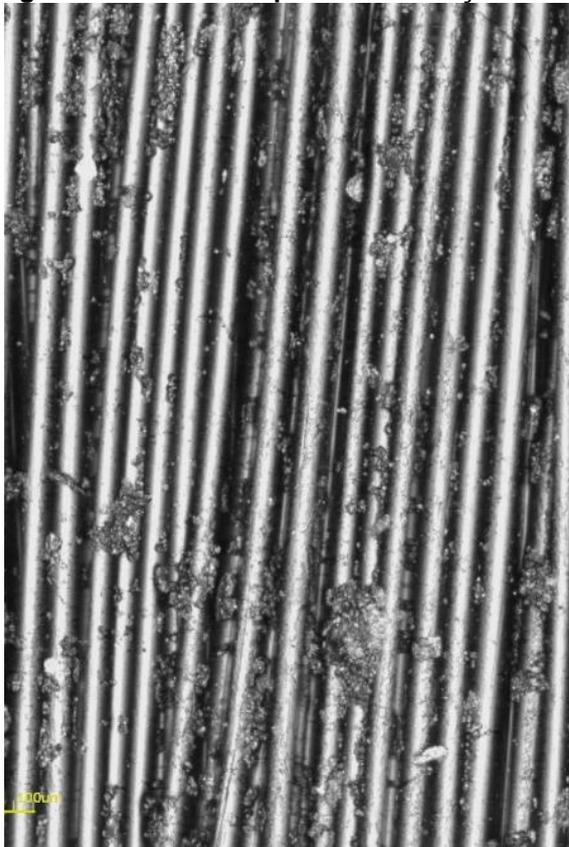


(a) 12 meses ou 8640 horas

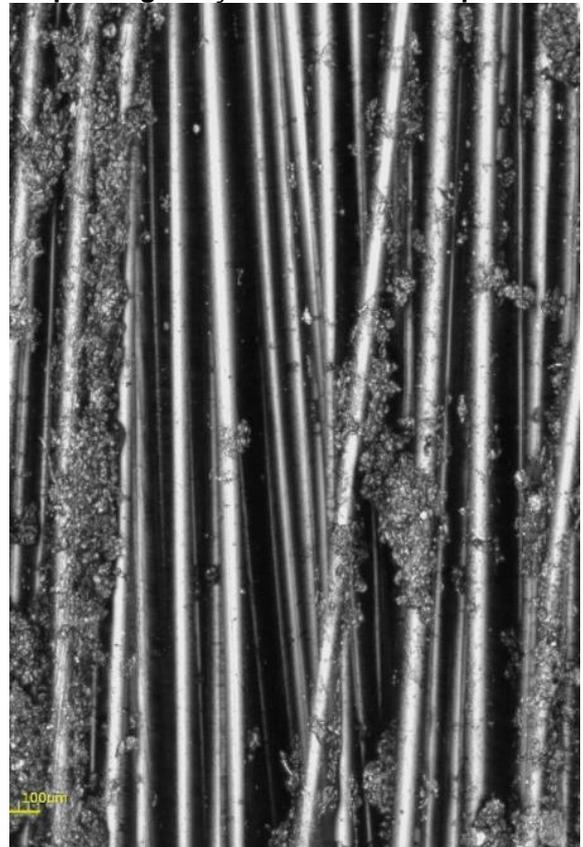


(b) 24 meses ou 17280 horas

**Figura A 17. Microscopia da colmatção do PET340 após degradação natural no Campo**

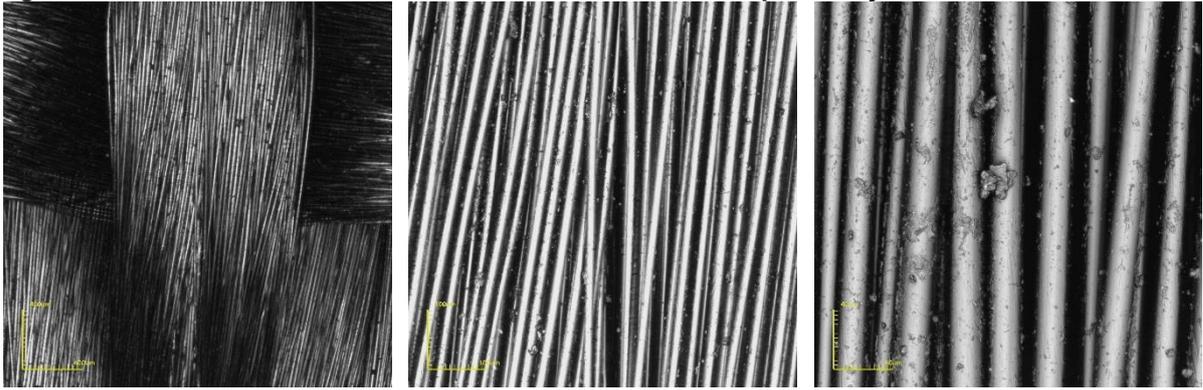


(a) 12 meses ou 8640 horas

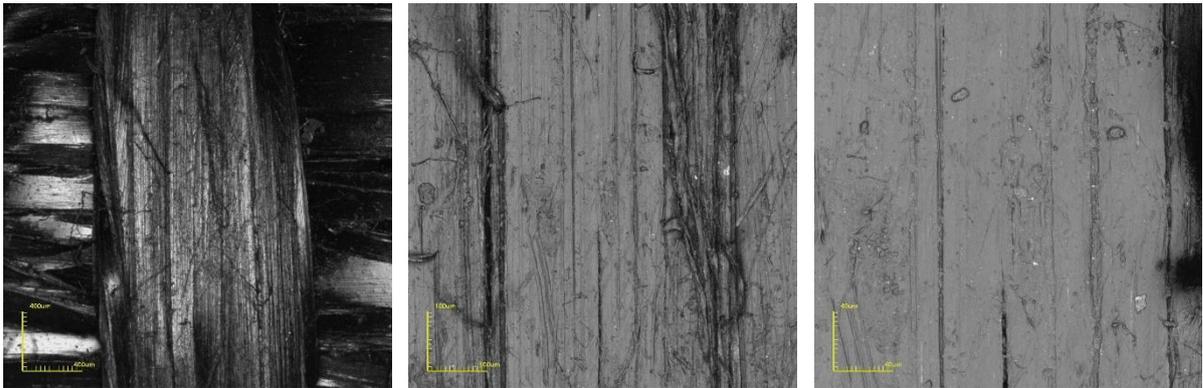


(b) 24 meses ou 17280 horas

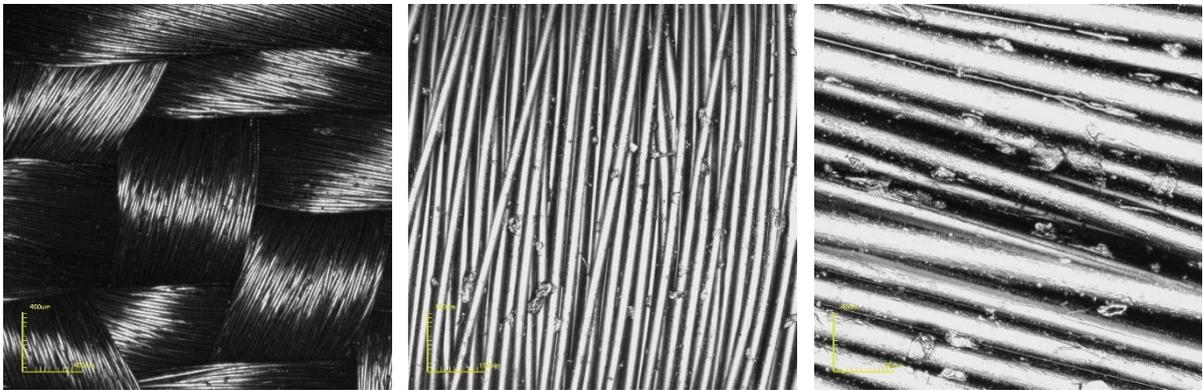
Figura A 18. Materiais submetidos a fluência acelerada em aproximações de 5, 20 e 50 vezes



(a) PET340



(b) PP500



(c) PET740



(d) PP925