

VANESSA DA CUNHA PINTO

**ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE
GEOTÊXTEIS TECIDOS**

**Tese apresentada ao Laboratório de
Engenharia Civil do Centro de Ciências e
Tecnologia, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil: Geotecnia.**

Orientador: Paulo César de Almeida Maia

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

Campos dos Goytacazes, 02 de fevereiro de 2006.

“O que somos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”
(Isaac Newton)

À DEUS

AGRADECIMENTOS

À UENF pelo apoio financeiro.

À HUESKER pelo fornecimento das amostras, apoio financeiro e particularmente ao Engenheiro André Estevão.

Ao LECIV pela disponibilidade dos laboratórios e pessoal técnico.

Ao Laboratório de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da UENF por possibilitar o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Ao professor Paulo César de Almeida Maia pela atenção, paciência e dedicação como orientador e amigo.

Aos professores que apoiaram esta pesquisa, especialmente à Fernando Saboya pela atenção e acolhida ao LECIV.

A todos colegas da UENF, em especial aos amigos Aline Costa, Fátima Miranda, Fernanda Azevedo, Gustavo de Castro Xavier, Isabel Ramos, Karla Fornaciari, Marcela Figueira Pinto, Rennan Valinho, Rodrigo Barros e Romeu Coridolla pelo incentivo e imprescindível ajuda.

Aos técnicos de laboratório do LECIV, LAMAV e LBCT que contribuíram na execução dos ensaios, em especial à Vanuzia, André e Milton pelo apoio prestado.

À todos funcionários do LECIV e da Oficina, em especial à D. Olívia e Bianca pela amizade e dedicação.

Aos meus pais e irmão pelo apoio dado em todas as fases deste trabalho.

À tia Arletti pela amizade e apoio irrestrito.

À Deus que sempre esteve ao meu lado e me deu forças para transpor todos os momentos difíceis.

RESUMO

A Engenharia Civil emprega diferentes tipos de materiais de construção. No entanto, alguns materiais de construção ficam expostos ao meio ambiente, e assim, sujeitos às modificações de suas propriedades pelos processos de degradação. Dentre os diferentes tipos de materiais de construção, os geossintéticos merecem destaque especial, tendo em vista a crescente utilização em obras, principalmente de cunho geotécnico. Neste sentido, o presente trabalho apresenta um estudo experimental para avaliação do comportamento de geotêxteis tecidos, constituídos de polipropileno, submetidos à degradação pela exposição ao meio ambiente. Geotêxteis tecidos de polipropileno, com diferentes teores de aditivos antioxidantes, foram expostos a processos de degradação natural no campo ou acelerada no laboratório. No laboratório são considerados procedimentos de degradação por exposição à radiação ultravioleta, lixiviação contínua e ciclos de saturação e secagem. Faz-se a avaliação da variação dos principais parâmetros dos materiais com o tempo e procedimentos de degradação. Os parâmetros considerados são obtidos por microscopia eletrônica, ensaios de resistência à tração não-confinada e de resistência ao puncionamento estático. Os resultados mostram a redução da resistência mecânica nos geossintéticos considerados, devido aos processos de degradação no campo ou no laboratório, além de mudanças na textura e aspecto do entrelaçamento das fibras do material. No entanto, os materiais estudados mostram-se consideravelmente resistentes à degradação natural no campo. Faz-se, também, a determinação da correlação dos diferentes procedimentos de degradação no laboratório com a degradação natural no campo, permitindo a previsão de comportamento do material a longo prazo.

Palavras-chave: geossintéticos, geotêxteis, degradação, comportamento a longo prazo, estudo experimental.

ABSTRACT

Different types of construction materials are used by Civil Engineering. However, some construction materials are exposed to the environment conditions and, therefore, subjected to the modifications of their properties by degradation processes. Among the different types of construction materials, the geosynthetics deserve special importance, considering its increase on use in engineering, principally of geotechnical types. In this way, this work presents an experimental study to evaluate the behavior of woven geotextiles, constituted of polypropylene, submitted to the degradation by environment exposition. Woven geotextiles of polypropylene, with different quantity of antioxidant additives, were exposed to natural degradation in the field or to accelerated degradation in the laboratory. The laboratory degradation procedures of exhibition to ultraviolet radiation, continuous leaching and wetting-drying cycles were considered. The variation of most important materials parameters with the intensity and degradation procedures is considered. The material parameters are obtained through electronic microscopy, unconfined tensile strength and punching strength. The results indicate the strength reduction of studied geosynthetics, due to the field or laboratory degradation processes. Changes in the texture and fibers interlacement aspect are observed too. However, the studied material presents a considerably resistant to the natural degradation in the field. To allow the estimate of the long term material behavior, this work presents correlations among different degradation procedures in the laboratory with the natural degradation in the field.

Word-key: geosynthetics, geotextiles, degradation, long term behavior, experimental study.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</i>	1
1.2 – <i>OBJETIVOS DA PESQUISA</i>	2
1.3 – <i>ESCOPO DA PESQUISA</i>	2
CAPÍTULO 2 - GEOSSINTÉTICOS E MATERIAIS POLIMÉRICOS – CONSIDERAÇÕES GERAIS	4
2.1 – <i>INTRODUÇÃO</i>	4
2.2 – <i>EVOLUÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS</i>	4
2.3 – <i>FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS</i>	6
2.4 – <i>TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS</i>	7
2.5 – <i>MATERIAIS CONSTITUINTES DOS GEOSSINTÉTICOS</i>	11
2.5.1 – Tipos e Características de Polímeros utilizados em Geossintéticos	12
2.5.2 – Características dos Polímeros	13
2.5.3 – Comportamento Tensão-Deformação dos Polímeros	16
2.5.4 - Comportamento Reológico dos Polímeros	19
2.5.5 – Aditivos para Polímeros	20
CAPÍTULO 3 - DEGRADAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS	22
3.1 – <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</i>	22
3.1.1 – Agentes de Degradação	23
3.1.2 – Mecanismos de Degradação dos Polímeros.....	23
3.1.2.1 – Degradação pela Radiação Ultravioleta	24
3.1.2.2 – Degradação pela Temperatura	27
3.1.2.3 – Degradação por Danos Mecânicos.....	30
3.1.2.4 – Degradação Biológica.....	31
3.1.2.5 – Degradação Química.....	32
3.1.2.6 – Degradação por Hidrólise	33
3.2 – <i>PROCEDIMENTOS DE DEGRADAÇÃO</i>	33
3.2.1 – Degradação Natural	34

3.2.2 – Degradação Acelerada em Laboratório	35
3.2.3 – Procedimentos de Degradação Acelerada em Laboratório	36
3.2.3.1 – <i>Radiação Ultravioleta</i>	36
3.2.3.2 – <i>Lixiviação Contínua</i>	37
3.2.3.3 – <i>Ciclos de Saturação e Secagem</i>	39
CAPÍTULO 4 - CASO E METODOLOGIA DE ESTUDO	40
4.1 – <i>INTRODUÇÃO</i>	40
4.2 – <i>MATERIAL UTILIZADO</i>	40
4.3 – <i>METODOLOGIA DE ESTUDO</i>	41
4.4 – <i>PROGRAMA EXPERIMENTAL</i>	42
4.5 – <i>PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS</i>	43
4.6 – <i>PROCEDIMENTOS DE DEGRADAÇÃO</i>	44
4.6.1 – Procedimento para Degradação Natural.....	44
4.6.1.1 – <i>Classificação Climática</i>	45
4.6.1.2 – <i>Temperatura do Ar</i>	46
4.6.1.3 – <i>Umidade Relativa do Ar</i>	46
4.6.1.4 – <i>Vento</i>	47
4.6.1.5 – <i>Precipitação Atmosférica</i>	48
4.6.1.6 – <i>Radiação Solar</i>	49
4.6.2 – Procedimento para Degradação Acelerada em Laboratório	49
4.6.2.1 – <i>Condensação e Exposição à Radiação Ultravioleta</i>	50
4.6.2.2 – <i>Lixiviação Contínua</i>	51
4.6.2.3 – <i>Ciclos de Saturação e Secagem</i>	52
4.7 – <i>MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)</i>	53
4.8 – <i>ENSAIOS MECÂNICOS</i>	54
4.8.1 – Ensaio de Resistência à Tração Não-Confinada.....	54
4.8.2 – Ensaio de Resistência ao Puncionamento	57
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1 – <i>INTRODUÇÃO</i>	59
5.2 – <i>MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA</i>	59
5.3 – <i>RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</i>	65
5.3.1 – Dispersão e Representatividade dos Resultados	68
5.3.2 – Materiais Intactos	72
5.3.3 – Degradação Natural no Campo	72
5.3.4 – Degradação Acelerada no Laboratório	74
5.3.4.1 – <i>Carga de Tração vs. Deformação</i>	74
5.3.4.2 – <i>Carga de Tração e Deformação na Ruptura</i>	79
5.3.4.3 – <i>Efeito da Degradação na Rigidez</i>	83

<i>5.4 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO</i>	90
5.4.1 – Dispersão e Representatividade dos Resultados	94
5.4.2 – Materiais Intactos	94
5.4.3 – Degradação Natural no Campo	94
5.4.4 – Degradação Acelerada no Laboratório	97
5.4.4.1 – <i>Força de Puncionamento vs. Penetração</i>	97
5.4.4.2 – <i>Força de Puncionamento e Penetração na Ruptura</i>	100
CAPÍTULO 6 - PREVISÃO DE COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO	105
6.1 – <i>INTRODUÇÃO</i>	105
6.2 – <i>RELAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE DEGRADAÇÃO NO CAMPO E NO LABORATÓRIO</i>	105
6.2.1 Índices de degradação	105
6.3 – <i>PREVISÃO DO COMPORTAMENTO</i>	120
6.3.1 – Fator de Correção dos Índices de Degradação	120
6.3.2 – Relação entre os Tempos de Degradação	122
6.3.2 – Exemplo de Previsão de Comportamento a Longo Prazo	123
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	126
7.1 – <i>QUANTO À METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS</i>	126
7.2 – <i>QUANTO À MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA</i>	126
7.3 – <i>QUANTO À DISPERSÃO DOS RESULTADOS</i>	126
7.4 – <i>QUANTO À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</i>	127
7.5 – <i>QUANTO À RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO</i>	127
7.6 – <i>QUANTO À PREVISÃO A LONGO PRAZO</i>	128
7.7 – <i>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</i>	128
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Geossintéticos comumente encontrados em obras geotécnicas	8
Figura 2.2 - Meros (ou unidades de repetição) dos principais polímeros empregados na fabricação dos geossintéticos (Abramento, 1995a).	15
Figura 2.3 - Comportamento tensão-deformação para polímeros (Callister Jr., 2002).	17
Figura 2.4 - Curva esquemática tensão-deformação para um polímero plástico mostrando como os limites de elasticidade e de resistência à tração são determinados (Callister Jr., 2002).	18
Figura 2.5 - Comportamento tensão-deformação para geotêxteis.	19
Figura 3.1 - Variação da intensidade da energia solar em função do comprimento de onda do espectro solar na região UV (Rosa, 1996 - Modificado).....	25
Figura 3.2 - Comprimento de onda da Radiação Solar no espectro visível e no ultravioleta (Koerner, 1994 – Modificado).....	26
Figura 3.3 - Perda de Resistência devido a Danos Mecânicos na Instalação (Adaptado de Koerner e Koerner, 1990).	30
Figura 3.4 - Detalhamento do equipamento Soxhlet de lixiviação contínua (Maia, 2001).	39
Figura 4.1 - Metodologia para avaliação da degradação em geossintéticos.	41
Figura 4.2 - Procedimento de amostragem.	44
Figura 4.3 - Amostras expostas com inclinação segundo a latitude local.	45
Figura 4.4 - Temperatura média mensal do ar, em °C, do período de 1975 a 1999 e referente ao período da pesquisa.	46
Figura 4.5 - Umidade relativa média mensal do ar, em %, média do período de 1975 a 1999 e referente ao período da pesquisa.....	47
Figura 4.6 - Valores da velocidade do vento média mensal, em m/s, em Campos dos Goytacazes, no período de 1975 a 1999 e no período da pesquisa, à altura de 10,0 m.	48
Figura 4.7 - Valores da precipitação pluviométrica média mensal, em mm, em Campos dos Goytacazes, no período de 1975 a 1999 e no período da pesquisa.	49
Figura 4.8 - Radiação solar mensal, em $W.m^{-2}$, na cidade de Campos dos Goytacazes, no período da pesquisa.	50

Figura 4.9 - Equipamento C-UV B do LECIV-UENF.....	51
Figura 4.10 - Equipamento Soxhlet convencional para ensaios de lixiviação contínua, cedido pela PUC-Rio.....	52
Figura 4.11 - Amostras em imersão durante o procedimento de saturação e secagem.....	53
Figura 4.12 - Conjunto de garras.....	55
Figura 4.13 – Detalhamento das garras para ensaios de tração não confinada em geotêxteis.....	56
Figura 4.14 – Suporte e punção pára ensaios de puncionamento em geotêxtil.....	57
Figura 4.15 - Suporte e punção desenvolvidos para acoplamento na máquina de ensaios.....	58
Figura 5.1 - Fotomicrografia da Amostra A não degradada (intacta).....	60
Figura 5.2 - Fotomicrografia da Amostra A com 420 dias de degradação natural.....	60
Figura 5.3 - Fotomicrografia da Amostra A com 720 horas de degradação por ciclos de saturação e secagem.....	61
Figura 5.4 - Fotomicrografia da Amostra A, aumentada em 200 vezes, intacta e com 720 horas de degradação por ciclos de saturação e secagem.....	61
Figura 5.5 - Fotomicrografia da Amostra A com 3200 horas de degradação por lixiviação contínua.....	62
Figura 5.6 - Fotomicrografia da Amostra A com 2000 horas de degradação por radiação ultravioleta.....	62
Figura 5.7 - Fotomicrografia da Amostra B livre de degradação (intacta).....	63
Figura 5.8 - Fotomicrografia da Amostra B com 420 dias de degradação natural.....	63
Figura 5.9 - Fotomicrografia da Amostra B com 720 horas de degradação por ciclos de saturação e secagem.....	64
Figura 5.10 - Fotomicrografia da Amostra B com 3200 horas de degradação por lixiviação contínua.....	64
Figura 5.11 - Fotomicrografia da Amostra B com 2000 horas de degradação por radiação ultravioleta.....	65
Figura 5.12 - Curvas carga vs. deformação em ensaios de tração não-confinada da Amostra A, intacta.....	66
Figura 5.13 - Curvas carga vs. deformação em ensaios de tração não-confinada da Amostra B, intacta.....	66

Figura 5.14 - Curvas carga vs. deformação médias das amostras A e B, intactas. ..	67
Figura 5.15 – Definição das rigidezes secantes a 2, 5 e 10 % da deformação.	70
Figura 5.16 – Definição das rigidezes tangente e secante a 50 % da carga de ruptura e secante no início da plastificação.....	71
Figura 5.17 - Variação da rigidez tangente com a carga normalizada, amostras intactas.....	71
Figura 5.18 - Variação da rigidez secante com a carga normalizada, amostras intactas.....	72
Figura 5.19 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra A.....	73
Figura 5.20 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra B.....	73
Figura 5.21 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra A.....	74
Figura 5.22 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra B.....	75
Figura 5.23 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por ciclos de saturação e secagem, Amostra A.	76
Figura 5.24 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por ciclos de saturação e secagem, Amostra B.	76
Figura 5.25 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por condensação e exposição à radiação ultravioleta, Amostra A. ...	77
Figura 5.26 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por condensação e exposição à radiação ultravioleta, Amostra B. ...	77
Figura 5.27 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por lixiviação contínua, Amostra A.	78
Figura 5.28 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por lixiviação contínua, Amostra B.	78
Figura 5.29 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem e natural no campo, para a Amostra A.	80

Figura 5.30 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem e natural no campo, para a Amostra B.	80
Figura 5.31 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta no equipamento C-UV B e natural no campo, para a Amostra A.	81
Figura 5.32 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta no equipamento C-UV B e natural no campo, para a Amostra B.	81
Figura 5.33 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet e natural no campo, para a Amostra A.	82
Figura 5.34 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet e natural no campo, para a Amostra B.	82
Figura 5.35 - Variação da rigidez tangente a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.	84
Figura 5.36 - Variação da rigidez tangente a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.	84
Figura 5.37 - Variação da rigidez secante a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.	85
Figura 5.38 - Variação da rigidez secante a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.	85
Figura 5.39 - Variação da rigidez secante final com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.	86
Figura 5.40 - Variação da rigidez secante final com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.	86
Figura 5.41 - Variação da rigidez secante a 2% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.	87
Figura 5.42 - Variação da rigidez secante a 2% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.	87
Figura 5.43 - Variação da rigidez secante a 5% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.	88

Figura 5.44 - Variação da rigidez secante a 5% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.....	88
Figura 5.45 - Variação da rigidez secante a 10% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.....	89
Figura 5.46 - Variação da rigidez secante a 10% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.....	89
Figura 5.47 - Curvas força de puncionamento vs. penetração em ensaios de puncionamento estático da Amostra A, intacta.	91
Figura 5.48 - Curvas força de puncionamento vs. penetração em ensaios de puncionamento estático da Amostra B, intacta.	92
Figura 5.49 - Curvas força de puncionamento vs. penetração médias das amostras A e B, intactas.	92
Figura 5.50 - Variação da força de puncionamento com a penetração do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra A.	95
Figura 5.51 - Variação da força de puncionamento com a penetração do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra B.	95
Figura 5.52 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra A.....	96
Figura 5.53 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra B.....	96
Figura 5.54 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra A intacta e degradada por ciclos de saturação e secagem.....	97
Figura 5.55 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra B intacta e degradada por ciclos de saturação e secagem.....	98
Figura 5.56 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra A intacta e degradada por condensação e exposição à radiação ultravioleta.	98
Figura 5.57 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra B intacta e degradada por condensação e exposição à radiação ultravioleta.	99

Figura 5.58 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra A intacta e degradada por lixiviação contínua.	99
Figura 5.59 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra B intacta e degradada por lixiviação contínua.	100
Figura 5.60 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem, para a Amostra A.	101
Figura 5.61 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem, para a Amostra B.	101
Figura 5.62 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação para a Amostra A degradada no equipamento C-UV B.	102
Figura 5.63 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação para a Amostra B degradada no equipamento C-UV B.	102
Figura 5.64 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet, para a Amostra A.	103
Figura 5.65 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet, para a Amostra B.	103
Figura 6.1 - Variação dos índices de degradação da rigidez tangente a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra A.	110
Figura 6.2 - Variação dos índices de degradação da rigidez tangente a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra B.	110
Figura 6.3 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra A.	111
Figura 6.4 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra B.	111
Figura 6.5 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante final para a carga de ruptura em tração, Amostra A.	112
Figura 6.6 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante final para a carga de ruptura em tração, Amostra B.	112

Figura 6.7 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 2% de deformação em tração, Amostra A.....	113
Figura 6.8 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 2% de deformação em tração, Amostra B.....	113
Figura 6.9 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 5% de deformação em tração, Amostra A.....	114
Figura 6.10 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 5% de deformação em tração, Amostra B.....	114
Figura 6.11 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 10% de deformação em tração, Amostra A.....	115
Figura 6.12 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 10% de deformação em tração, Amostra B.....	115
Figura 6.13 - Variação dos índices de degradação da carga de tração na ruptura, Amostra A.	116
Figura 6.14 - Variação dos índices de degradação da carga de tração na ruptura, Amostra B.	116
Figura 6.15 - Variação dos índices de degradação da deformação na ruptura em tração, Amostra A.	117
Figura 6.16 - Variação dos índices de degradação da deformação na ruptura em tração, Amostra B.	117
Figura 6.17 - Variação dos índices de degradação da força de penetração na ruptura, Amostra A.	118
Figura 6.18 - Variação dos índices de degradação da força de penetração na ruptura, Amostra B.	118
Figura 6.19 - Variação dos índices de degradação da penetração máxima no puncionamento, Amostra A.	119
Figura 6.20 - Variação dos índices de degradação da penetração máxima no puncionamento, Amostra B.	119
Figura 6.21 - Comparação entre o índice de degradação natural e o índice de degradação obtido no laboratório, em relação à tempo de degradação, sem a correção.	121

Figura 6.22 - Comparação entre o índice de degradação natural e o índice de degradação obtido no laboratório, em relação ao tempo de degradação, após a correção do índice de degradação no laboratório I_{nat}	121
Figura 6.23 - Relação entre o tempo de degradação no campo e o tempo de degradação no laboratório para um mesmo valor do índice de degradação....	122
Figura 6.24 - Relação entre o tempo de degradação no campo (natural) e o tempo de degradação no laboratório pelo índice de degradação da força de penetração na ruptura de diferentes procedimentos de degradação, Amostra A.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Primeiros polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos (ABINT, 2004).....	12
Tabela 2.2 - Matérias-primas mais utilizadas na fabricação de geossintéticos (ABINT, 2004).....	12
Tabela 2.3 - Influência do tipo de polímero e do processo de fabricação nas principais propriedades de durabilidade e de longo prazo de geossintéticos (Christopher & Holtz, 1985 – modificado).....	16
Tabela 4.1 - Especificações técnicas do material, segundo o fabricante.	40
Tabela 4.2 - Programa para a degradação de corpos de prova com 20x50 cm de dimensões.....	42
Tabela 4.3 - Programa de ensaios mecânicos executado para corpos de prova com 5x15 cm de dimensões.	43
Tabela 5.1 - Valores da carga, coeficiente de variação e deformação na ruptura para a Amostra A.	68
Tabela 5.2 - Valores da carga, coeficiente de variação e deformação na ruptura para a Amostra B.	68
Tabela 5.3 - Variação da rigidez quanto ao tipo e intensidade de degradação da Amostra A.	69
Tabela 5.4 - Variação da rigidez quanto ao tipo e intensidade de degradação da Amostra B.	69
Tabela 5.5 - Valores da força de puncionamento, coeficiente de variação e penetração na ruptura para a Amostra A.	93
Tabela 5.6 - Valores da força de puncionamento, coeficiente de variação e penetração na ruptura para a Amostra B.	93
Tabela 6.1 - Variação dos índices de degradação para a Amostra A, resistência à tração.	107
Tabela 6.2 - Variação dos índices de degradação para a Amostra B, resistência à tração.	107

Tabela 6.3 - Força de puncionamento, coeficiente de variação, penetração e índices na ruptura para a Amostra A submetida a ensaios de puncionamento estático.	108
Tabela 6.4 - Força de puncionamento, coeficiente de variação, penetração e índices na ruptura para a Amostra B submetida a ensaios de puncionamento estático.	108
Tabela 6.5 - Valores do fator de correção f_c para cada propriedade e tipo de degradação.	122
Tabela 6.6 – Tempos de degradação no laboratório correspondentes a 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.....	124
Tabela 6.7 – Índice de degradação no laboratório corrigido para 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.....	124
Tabela 6.8 – Índice de degradação no laboratório sem correção para 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.....	124
Tabela 6.9 – Força de penetração para 0 (intacto), 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviações:

ABINT	Associação Brasileira das Indústrias de Nãotecidos e Tecidos Técnicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CBR	Ensaio de Capacidade de Suporte
IGS	<i>International Geosynthetics Society</i>

Símbolos:

PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
UV	Ultravioleta
UV-A	Faixa de radiação ultravioleta entre 400 a 315 nm
UV-B	Faixa de radiação ultravioleta entre 315 e 290 nm
UV-C	Faixa de radiação ultravioleta abaixo de 290 nm
%	Porcentagem
α	Raio alfa
β	Raio beta
γ	Raio gama
λ	Comprimento de onda
σ	Resistência
ε	Deformação
ε_f	Deformação na ruptura
T	Carga de tração
T_f	Carga de tração na ruptura
CV	Coefficiente de variação
J	Rigidez
F _p	Força de penetração
F _{pf}	Força de penetração na ruptura
P	Penetração
P _f	Penetração na ruptura
I	Índice de degradação
f _c	Fator de correção

Unidades:

nm	Nanômetro	°C	Grau centígrado
mm	Milímetro	h	Hora
cm	Centímetro	min	Minuto
m	Metro	s	Segundo
N	Newton		
kN	Quilo-Newton (10 ³ N)		
g	Grama		

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Engenharia Civil emprega diferentes tipos de materiais de construção. A adoção destes materiais está normalmente relacionada a uma norma ou especificação que define a forma de aplicação e as características adequadas dos materiais segundo o fim desejado. No entanto, alguns materiais de construção ficam expostos ao meio, e assim sujeitos às modificações de suas características pela ação dos agentes de alteração, comprometendo a solidez da obra. Entende-se por agentes de alteração o conjunto de fatores que atuam para modificar as características do material. Na construção civil, os principais agentes de alteração são de ordem climática, como por exemplo: temperatura, umidade relativa do ar, precipitação atmosférica, vento, pressão atmosférica e outros.

O conhecimento das propriedades dos materiais de construção a fim de se prever o comportamento das construções durante a vida útil de utilização é fundamental na Engenharia. Deste modo, as transformações destas propriedades pela alteração constituem um importante aspecto que também deve ser considerado e avaliado nos projetos.

Particularmente, na Engenharia Geotécnica o comportamento de alguns materiais de construção é significativamente influenciado pelas características de durabilidade e alterabilidade, como, por exemplo, os geossintéticos, as rochas, os pavimentos, as cerâmicas e outros. A durabilidade deve ser entendida como a propriedade que garante o perfeito desempenho e integridade do material durante um determinado período de tempo de exposição aos agentes agressivos do ambiente no qual está instalado.

Sob o ponto de vista de durabilidade, os geossintéticos, definidos pela NBR 12.553 (ABNT, 1997) como produto polimérico industrializado, cujas propriedades contribuem para melhoria de obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções como: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial, merecem destaque especial devido à sua crescente utilização em obras civis.

1.2 – OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo e a avaliação das transformações sofridas pelos geossintéticos tecidos, constituídos de polipropileno, utilizados na Construção Civil, provocadas pela exposição ao meio natural no campo e artificialmente no laboratório.

Faz-se a avaliação dos diferentes procedimentos de degradação no laboratório para simulação das condições de campo. Para a degradação dos materiais no laboratório foram utilizados procedimentos de degradação por exposição à radiação ultravioleta, lixiviação contínua e por ciclos de saturação e secagem com o intuito de se avaliar se houve ou não perda significativa das principais propriedades físicas e mecânicas destes materiais.

Como resultado, pretende-se fornecer dados referentes às possíveis modificações que os materiais sofrem devido à alteração. E, por meio destes resultados, prever o comportamento a longo prazo dos materiais estudados.

1.3 – ESCOPO DA PESQUISA

A dissertação é composta de 8 capítulos, apresentando inicialmente, neste capítulo a introdução ao tema da pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 2 apresenta as considerações gerais sobre os geossintéticos e os polímeros que os constituem.

O Capítulo 3 aborda os tipos de degradação sofridas pelos geossintéticos e os procedimentos utilizados para se induzir a degradação.

No Capítulo 4 são apresentadas informações sobre o material de estudo e as características climáticas da região onde este foi exposto. Neste Capítulo também são apresentados e comentados a metodologia utilizada e o programa experimental desenvolvido. Ressalta-se que os ensaios foram adaptados aos tamanhos das amostras exigindo a produção de garras e suportes especiais.

No Capítulo 5 são apresentados, comentados e discutidos os resultados e as análises dos ensaios realizados com os geotêxteis utilizados na pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta a correlação entre a intensidade de degradação no campo e no laboratório para os geotêxteis estudados com base nas propriedades mecânicas.

Finalmente, no Capítulo 7, dá-se o encerramento do trabalho com a apresentação das conclusões e as recomendações para pesquisas futuras sobre o assunto.

O Capítulo 8 lista as referências bibliográficas que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Capítulo 2 - GEOSSINTÉTICOS E MATERIAIS POLIMÉRICOS – CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 – INTRODUÇÃO

A utilização de geossintéticos tem se tornado cada vez mais freqüente em obras de engenharia, devido à variedade de tipos de produtos e à variedade de aplicações a que se destinam. Desta forma, este capítulo vem apresentar os diferentes tipos de geossintéticos com suas várias finalidades, bem como as características dos materiais constituintes dos geossintéticos.

2.2 – EVOLUÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

A utilização de materiais alternativos para melhorar as características do solo é antiga e remonta desde os tempos da Antigüidade. Dados históricos indicam que foram utilizadas camadas de solo intercaladas com mantas de raízes na construção das muralhas do Ziggurat, na Mesopotâmia e na muralha da China. Os Incas utilizavam lã de lhama misturada com solo para a construção de estradas. Troncos de árvores, estivas de junco, mantas de raízes, entre outros, foram utilizados, misturados ao solo, para lhe conferir melhores características.

Uma análise sistêmica das situações permitiu que, com o passar do tempo, este tipo de arranjo começasse a ser aperfeiçoado, buscando uma melhor preparação, aplicação e arrumação dos materiais, a fim de que os resultados obtidos fossem cada vez melhores.

Em 1926, nos Estados Unidos, o Departamento de Estradas da Carolina do Sul introduziu, pela primeira vez, o uso de tecidos no reforço de estradas. Na década de 50 os geotêxteis passaram a ser utilizados como elementos de drenagem, filtração, e em obras contra a erosão, principalmente nos EUA, Japão e Holanda. Em 1966, nos Estados Unidos, ocorreu a primeira aplicação de geotêxtil não-tecido de fibras em recapeamento asfáltico. Em 1967, no Japão, georredes foram utilizadas em obras de reforço de aterros sobre solos moles, o que provocou o desenvolvimento das geogrelhas. Em 1968, ocorreram as primeiras aplicações de geotêxteis não-

tecidos como elemento separador e de reforço entre materiais com características físicas e mecânicas diferentes, principalmente em obras viárias e controle da erosão, na Europa. Na década de 70 foram utilizados geotêxteis em reforço de grandes aterros, em camadas múltiplas em taludes e muros de contenção. Construções de grandes barragens foram iniciadas, tendo geotêxtil no sistema drenante/filtrante, como é o caso da *Frauenau Dam*, na Alemanha Ocidental, e da *Hans Stridjon Dam*, na África do Sul. Em 1971 ocorreram as primeiras aplicações de geotêxteis no Brasil, principalmente em obras rodoviárias (reforço de aterro sobre solos de baixa capacidade portante), como é o caso da BR-101, em Angra dos Reis - RJ, e na rodovia Transamazônica. O primeiro geossintético fabricado no Brasil foi um geotêxtil não-tecido de filamentos contínuos, cuja produção comercial começou em 1973. Naquela década, uma das principais aplicações deste geotêxtil foi na drenagem da Rodovia dos Bandeirantes, no Estado de São Paulo. Em 1977 realizou-se na França a *International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, ocasião em que o professor Jean Pierre Giroud propôs o emprego dos termos *geotêxtil* e *geomembrana* (ABINT, 2004). Na década de 80 foi criada a *International Geosynthetics Society* (IGS) e ocorreram eventos como: *II International Conference on Geotextiles* (Las Vegas, 1982), *III International Conference on Geotextiles* (Viena, 1986), onde se cunhou o termo geossintético. São também desta década os comitês de geossintéticos: *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D35, *Comité Européu de Normalização* (CEN), *Geosynthetic Research Institute* (GRI), *International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ISSMFE) TC9 e *International Standardization Organization* (ISO). Também na década de 80, tem início no Brasil a fabricação dos geotêxteis tecidos, sendo uma das primeiras obras significativas o reforço de aterros sobre solos de baixa capacidade de suporte no Conjunto Residencial Tancredo Neves, do Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), no Rio de Janeiro, em 1981. Nessa década, o uso dos geossintéticos esteve voltado para a recuperação de áreas poluídas e para a construção de obras de contenção e proteção ambiental. Também foi criada na década de 80 a Comissão de Estudos de Geossintéticos, pelo Comitê Brasileiro de Construção Civil – CB-02 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além da formação da Abint. No decorrer da década de 90, o impulso gerado pelos estudos teóricos apresentados, de casos históricos e novas aplicações, desencadeou o surgimento de uma grande variedade de produtos e

usos que, ao se combinarem, resultaram na criação de inúmeras e importantes utilizações, contribuindo para que as barreiras para o avanço da engenharia sejam derrubadas. Alguns eventos são significativos como: *IV International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products* (Holanda, 1990), *V International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products* (Cingapura, 1994), *VI International Conference on Geosynthetics* (Atlanta, 1998). No Brasil, em 1992, em Brasília, realiza-se o Seminário sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia – Geossintéticos 92; em 1995, em São Paulo, ocorre o II Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos; em 1999, tem lugar no Rio de Janeiro o III Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos/ I Simpósio Sul-americano de Geossintéticos e, em 2003 ocorre o IV Simpósio Brasileiro sobre Aplicações de Geossintéticos/ II Simpósio Sul-americano de Geossintéticos, em Porto Alegre. Em 1996, foi criada a IGS-Brasil. Em 1998, realizou-se em São Paulo o 1º Curso Sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente, organizado pela IGS-Brasil. Tais eventos têm sido fundamentais para a difusão dos geossintéticos no âmbito geotécnico, empresarial e acadêmico. A primeira tese de mestrado no país sobre o assunto foi apresentada em 1981, na UFRJ (Palmeira, 1981) e a primeira tese de doutorado foi defendida um ano após, na USP- Escola de Engenharia de São Carlos (Seraphim, 1982). Em 2004 foi publicado o primeiro livro brasileiro sobre o assunto, o Manual Brasileiro de Geossintéticos, da ABINT.

Atualmente, diversas instituições brasileiras de ensino e pesquisa desenvolvem estudos teóricos e experimentais sobre geossintéticos, com relevância reconhecida no meio internacional. A grande maioria desses trabalhos relata o comportamento geomecânico dos materiais, no entanto uma pequena fração trata de aspectos relativos à degradação e durabilidade dos geossintéticos. Dentre estes, destaque especial é dado ao trabalho de Matheus (2002) como pioneiro na avaliação da degradação sistemática de geossintéticos por meio de procedimentos de laboratório.

2.3 – FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Numa obra de engenharia, os geossintéticos podem exercer concomitantemente, uma ou mais funções. A seguir, são definidas as principais funções, de acordo com a NBR 12.553: Geossintéticos - Terminologia (ABNT, 1997).

- **Separação** – evitar a mistura ou interação de materiais adjacentes;

- **Reforço** – utilização das propriedades mecânicas de um geossintético para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica;
- **Proteção** – limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas;
- **Drenagem** – coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético;
- **Filtração** – retenção de um solo ou de outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento;
- **Impermeabilização** – bloqueio ou desvio de fluidos;
- **Controle de erosão superficial** – prevenção de erosão superficial de partículas de solo devido a escoamento superficial de um fluido.

A utilização dos geossintéticos fica definida, então, pela função que se pretende para o material. Neste sentido, destaca-se que os processos de degradação podem afetar os geossintéticos modificando uma ou mais das funções destacadas anteriormente. Além disto, esperasse que o processo de degradação predominante seja influenciado pela funcionalidade do material.

2.4 – TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

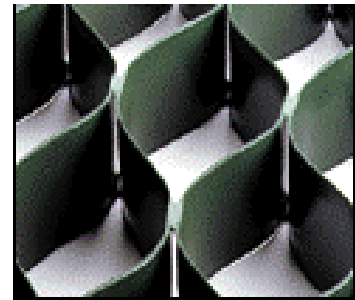
A Figura 2.1 mostra esquematicamente os geossintéticos mais encontrados em aplicações geotécnicas.

No entanto, a cada dia, novos geossintéticos são desenvolvidos. Deste modo, alguns ainda não foram devidamente definidos ou classificados, como, por exemplo, os geocompostos para recapeamento asfáltico e para filtração. Da mesma forma, as classificações, definições e designações por siglas diferem entre países e organizações.

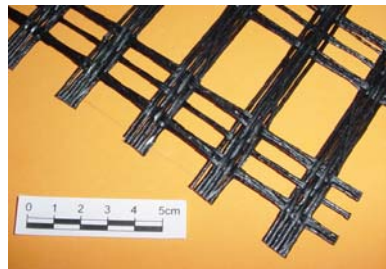
A seguir é apresentada a classificação, definição e siglas dos geossintéticos, de acordo com a NBR 12.553 – Geossintéticos – Terminologia (ABNT, 1997). Entre colchetes são apresentadas as siglas adotadas pela *International Geosynthetic Society (IGS)*, quando existem e diferem das brasileiras.



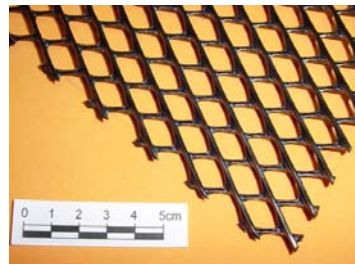
Geocompostos



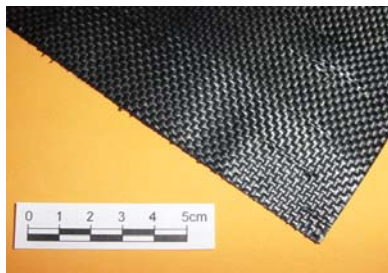
Geocélula



Geogrelhas



Georrede

Geotêxtil não-tecido
agulhado

Geotêxtil tecido



Geomembrana



Biomanta



Geodreno



Tela para Gabião

Figura 2.1- Geossintéticos comumente encontrados em obras geotécnicas

- **Geobarra, GBA** – produto em forma de barra com função predominante de reforço;
- **Geocélula, GL [GCE]** – produto com estrutura tridimensional aberta, constituída de células interligadas que confinam mecanicamente os materiais nela inseridos, com função predominante de reforço e controle de erosão;

- **Geocomposto, GC** – produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica;
 - **Geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante, GCL** – estrutura formada pela associação de geossintéticos a um material argiloso de baixa condutividade, desenvolvida para a função de barreira impermeabilizante;
 - **Geocomposto para reforço, GCR** – estrutura formada pela associação de geossintéticos não-similares, desenvolvida para reforço;
- **Geoespaçador [GSP]** – produto com estrutura tridimensional constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizado predominantemente como meio drenante. Exemplo: geoespaçador em cúspides nas duas faces (ou de pata dupla) na cor preta, e de cúspides em uma face (ou de pata simples) na cor amarela, utilizados como meio drenante;
- **Geoexpandido** – produto fabricado a partir de um polímero expandido formando uma estrutura tridimensional leve, com finalidade principal de aliviar o peso de uma estrutura geotécnica. Exemplo: blocos de geoexpandido fabricados com EPS (poliestireno expandido) aplicados em substituição a aterros convencionais;
- **Geoforma** – estrutura realizada a partir de geossintéticos com a finalidade de conter materiais de modo permanente ou provisório. Exemplo: geoformas tipo colchão, preenchidas com argamassa, para revestimento de canais;
- **Geogrelha, GG [GGR]** – produto com estrutura em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, e constituído por elementos resistentes à tração. É considerado unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas;
- **Geomanta, GA [GMA]** – produto com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão superficial do solo, também conhecido como “biomanta” quando biodegradável. Exemplo: geomanta utilizada no controle de erosão superficial de taludes;

- **Geomembrana, GM [GMB]** – produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação. Exemplo: geomembrana polimérica flexível, utilizada em obras de impermeabilização;
 - **Geomembrana reforçada** – geomembrana com armadura de reforço incorporada ao produto, formando um conjunto monolítico;
 - **Geomembrana texturizada** – geomembrana com acabamento superficial com função de aumentar as características de atrito de interface;
- **Georrede, GN [GNT]** – produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem. Exemplo: georrede de pequena espessura, utilizada como núcleo constituinte de geocomposto drenante;
- **Geotêxtil, GT [GTX]** – produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica;
 - **Geotêxtil não-tecido, Gtnw** – produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos;
 - **Geotêxtil não-tecido agulhado** – fibras interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem;
 - **Geotêxtil não-tecido termoligado** – fibras interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento;
 - **Geotêxtil não-tecido resinado** – fibras interligadas por meio de produtos químicos;
 - **Geotêxtil tecido, GTw** – produto obtido do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais denominadas *trama* (sentido transversal) e *urdume* (sentido longitudinal). Exemplo: geotêxtil tecido preto, constituído de filamentos tipo laminetes, utilizado com diversas funções em vários tipos de obras de engenharia;

- **Geotêxtil tricotado** – produto obtido do entrelaçamento de fios por tricotamento;
- **Geotira** – produto em forma de tira com função predominante de reforço;
- **Geotubo** – produto de forma tubular com função drenante. Exemplo: geotubo corrugado, flexível, utilizado com elemento drenante, condutor, em vários tipos de drenos subterrâneos;

Nota-se da variedade de geossintéticos e dos diferentes tipos de processos construtivos envolvidos que o comportamento deve depender, sobretudo, do tipo de geossintético. Espera-se deste modo, que a durabilidade também seja influenciada pelo tipo de geossintético.

2.5 – MATERIAIS CONSTITUINTES DOS GEOSSINTÉTICOS

No início do século XX, surgiu um fato que marcou profundamente a história científica da humanidade. Ficou provado que alguns materiais produzidos pela química incipiente do final do século XIX, e que até então eram considerados como colóides, consistiam na verdade de moléculas gigantescas, resultado do encadeamento de milhares de unidades moleculares. Esses produtos foram denominados de polímeros pelo sueco Jöns Jacob Berzelius, em 1933 (Stevens, 1990). Os polímeros apresentam repetições de pequenas unidades estruturais denominadas meros que se dispõem em longas cadeias principais. O mero representa a unidade que se repete na cadeia de um polímero, enquanto o termo monômero é usado para se referir a uma molécula que consiste em um único mero (Callister Jr., 2002). Então, polímeros são compostos obtidos através da combinação, por meio de reações químicas, de moléculas de baixo peso molecular denominadas monômeros (Matheus, 2002).

Os geossintéticos, por sua vez, são constituídos basicamente por polímeros. Em função da natureza, do processo de fabricação, tipo e disposição estrutural das fibras, os geossintéticos diferenciam-se entre si em propriedades e comportamentos. O uso de materiais poliméricos para fabricar geossintéticos floresceu a partir de 1960, mas há registros de utilização em menor escala em décadas anteriores. A Tabela 2.1 sintetiza registros históricos de emprego de geossintéticos e a data de surgimento dos mais importantes polímeros utilizados, segundo ABINT (2004).

Tabela 2.1 - Primeiros polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos (ABINT, 2004).

Data	Produto/Sigla	Primeira aplicação	Referências
1933	PVC	Revestimento de piscinas	Staff (1984)
1939	PEBD	Barreiras impermeabilizantes em estradas	Bell e Yoder (1957)
1955	PEAD	Revestimento de margens de canais	Hawkins (1984)
1956	PA, PP e PET	Colchões de geotêxtil tecido para proteção de fundo de rios	Van Zaten (1983)

2.5.1 – Tipos e Características de Polímeros utilizados em Geossintéticos

Os principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos estão relacionados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Matérias-primas mais utilizadas na fabricação de geossintéticos (ABINT, 2004).

Matéria-prima	Sigla	Geossintéticos
Poliâmida (náilon)	PA	GG, GT, GN, GCD, GCL, geotira, geobarra
Cloreto de polivinila	PVC	GM, GG, geotubo
Poliéster	PET	GT, GG, GCL, GCD, GB, GN, geotira
Poliestireno expandido	EPS	GCD, GSP, geoexpandido
Polietileno	PE	GM, GG, GC, GSP, GL, GA
Polietileno de alta densidade	PEAD	GM, GC, GSP, geotira, geotubo
Polipropileno	PP	GM, GT, GG, GCL, GCD, GN

A seguir são descritas as características dos principais polímeros utilizados como matéria-prima na fabricação de geossintéticos.

- **Polipropileno, PP** – é um polímero termoplástico semicristalino, o mais leve utilizado na fabricação de geossintéticos. Com o propósito de torná-lo mais durável, são adicionados estabilizantes térmicos e negro-de-fumo para reduzir a degradação causada pela radiação ultravioleta. Normalmente, também se adiciona antioxidantes ao polipropileno (Vertematti, *et al.*, 2004). Salienta-se ainda, que o polipropileno é altamente resistente, tanto aos meios ácidos quanto aos básicos (pH variando de 2 a 13). Assim, pode-se empregá-lo em ambientes agressivos, como aterros sanitários (Castro, 1999).
- **Polietileno, PE** – produto resultante da polimerização de monômeros de etileno. Suas propriedades mecânicas estão fortemente relacionadas com o

comprimento das cadeias moleculares, que podem atingir centenas de milhares de pesos moleculares. O polipropileno e o polietileno possuem muitas similaridades químicas e compõem o grupo das poliolefinas. O polietileno, PE é um termoplástico bastante cristalino, tendo em vista o elevado empacotamento das cadeias poliméricas. Isso dá a ele alta resistência química, pela dificuldade de ser permeado por gases, líquidos e vapores (ABINT, 2004).

- **Poliéster, PET** – produto resultante da polimerização de etilenoglicol e dimetiltereftalato ou ácido tereftálico. Difere da maioria dos polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos porque sua estrutura molecular contém oxigênio. Muito utilizado na fabricação de geossintéticos com necessidade de alta resistência à tração, pois possui cadeias moleculares mais pesadas (ABINT, 2004). Os poliésteres possuem elevado módulo de elasticidade, são pouco deformáveis e apresentam comportamento adequado quanto à fluência (Castro, 1999). Sob condições de acidez ou de elevada alcalinidade, os trechos da cadeia em éster podem sofrer hidrólise. Normalmente contêm aditivos para minimizar degradações térmica e por ultravioleta.
- **Poliamida, PA** – são conhecidas como náilon. A umidade pode reduzir sua rigidez e estabilidade. Compostos metálicos e negro-de-fumo são adicionados para garantir melhores propriedades de engenharia e reduzir a degradação por ultravioleta (ABINT, 2004).
- **Cloreto de polivinila, PVC** – formado pela polimerização de vinil clorado e aditivos. O PVC apresenta elevada resistência a químicos inorgânicos, mas é susceptível ao ataque de solventes e óleos orgânicos (ABINT, 2004).

2.5.2 – Características dos Polímeros

Para atender as inúmeras necessidades da engenharia, um polímero deve apresentar propriedades como: resistência mecânica, rigidez, durabilidade, elasticidade e resistência química, que, por sua vez, são afetadas por várias características, incluindo o peso molecular, a morfologia (estrutura, arranjo e forma das moléculas), cristalinidade e a temperatura de transição vítrea.

O peso molecular é uma das características que mais afeta o comportamento mecânico. Para que um certo tipo de polímero ofereça vantagens técnicas e comerciais, seu peso molecular deve atingir um determinado valor mínimo. Em geral, quanto maior o peso molecular médio, maior a resistência têxtil do produto. No entanto, quando o peso molecular torna-se muito elevado, surgem dificuldades de fabricação (ABINT, 2004).

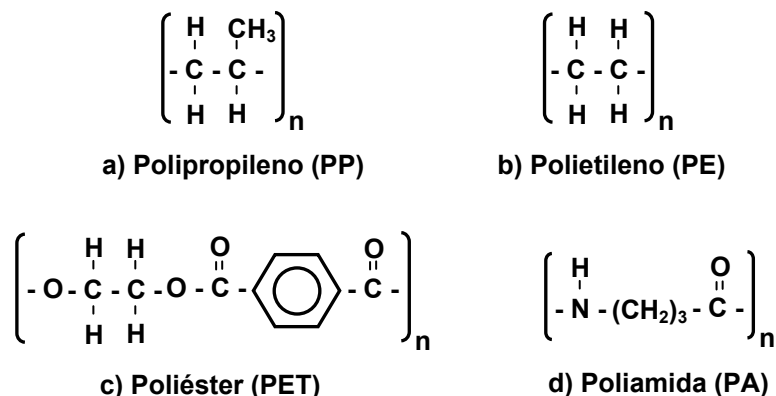
Tão importante quanto o peso molecular é a estrutura química do polímero. As propriedades mecânicas se elevam à medida que há uma maior atração eletroquímica entre as macromoléculas formadoras do polímero.

A resistência química dos polímeros é uma característica necessária quando o material é colocado em ambientes agressivos. No geral, quanto mais cristalino o polímero, mais quimicamente resistente ele é, devido ao maior empacotamento das cadeias poliméricas. Logo, a cristalinidade é um aspecto importante nos polímeros, que podem ser amorfos ou cristalinos. Os polímeros denominados cristalinos são, na verdade, parcialmente cristalinos, e o valor de cristalinidade é representado pelo grau de cristalinidade. No estado cristalino as moléculas são orientadas ou alinhadas, à semelhança de um cristal, enquanto que o estado amorfo caracteriza-se por uma completa ausência de ordem entre as moléculas (ABINT, 2004). Assim, polímeros cristalinos são aqueles que possuem parte de sua estrutura amorfa e a outra parte cristalina. Ressalta-se que, quanto maior a cristalinidade, maior a rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência à abrasão, temperaturas de fusão e transição vítrea. A densidade das zonas cristalinas também é maior do que a das zonas amorfas.

A temperatura de transição vítrea indica a mudança de comportamento do polímero de um estado sólido para outro denominado de mobilidade, quando o material se torna mais deformável. Acima desse estado, as zonas amorfas encontram-se excitadas e em movimento constante (ABINT, 2004).

A polimerização ocorre de duas maneiras principais: a primeira por condensação, onde as moléculas são unidas com a eliminação simultânea de água, álcool ou outras substâncias simples. Tais polímeros possuem estruturas ligadas a átomos de nitrogênio e oxigênio (figuras 2.2 c e 2.2 d). A outra maneira importante é a polimerização por adição, onde a cadeia polimérica forma-se pela adição de monômeros. Estes polímeros possuem estruturas ligadas a átomos de carbono e hidrogênio (figuras 2.2 a e 2.2 b).

O comprimento médio das cadeias de um polímero é especificado pelo número médio de repetições das unidades nas cadeias. A isto é dado o nome de grau de polimerização n (Figura 2.2).



onde: n é o grau de polimerização.

Figura 2.2 - Meros (ou unidades de repetição) dos principais polímeros empregados na fabricação dos geossintéticos (Abramento, 1995a).

Considerando as propriedades físicas, os polímeros podem ser divididos em três grupos: os termoplásticos (polietileno, polipropileno, poliéster saturado e poliamida), os termofixos e os elastômeros.

Os polímeros termoplásticos são aqueles que podem sofrer repetidos estágios de aquecimento e resfriamento, e podem ser moldados na forma que se deseja, sem perder suas características básicas. Os polímeros termofixos e os elastômeros vulcanizados são aqueles que, no seu estado final de aplicação, não podem sofrer estágios repetidos de aquecimento e resfriamento. Qualquer aquecimento adicional, após a formação do polímero, implicará em sua degradação. As borrachas vulcanizadas são: Borracha Nitrílica, Borracha Butílica e EPDM (elastômero sintético baseado em etileno, propileno e pequenas quantidades de dieno não-conjugado) (Palmeira, 1996).

O comportamento dos geossintéticos, principalmente no que se refere ao comportamento a longo prazo, será condicionado sobretudo pelo processo de fabricação e também pelo tipo de polímero. Entre outras propriedades que podem ser influenciadas pelo tipo de polímero, encontra-se a resistência do geossintético aos mecanismos de degradação por ações de raios ultravioleta, resistência à temperatura, resistência à hidrólise, resistência à degradação química e biológica,

além de propriedades físicas como, por exemplo, o comportamento à fluência e resistência aos danos de instalações (Koerner, 1994; Abramento, 1995b; Agnelli, 1999).

Christopher & Holtz (1985) apresentam dados onde são comparados os graus (fatores) de influências do processo de fabricação e o tipo de polímero utilizado na sua durabilidade (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Influência do tipo de polímero e do processo de fabricação nas principais propriedades de durabilidade e de longo prazo de geossintéticos (Christopher & Holtz, 1985 – modificado).

Propriedades		Nível de influência	
		do tipo de polímero	do processo de fabricação
Mecânicas	<i>Fluência</i>	muito significativa	significativa
	<i>Abrasão</i>	Pequena	muito significativa
Hidráulicas	<i>Colmatação</i>	desconhecido	muito significativa
De durabilidade	<i>Térmica</i>	muito significativa	pequena
	<i>Biológica</i>	muito significativa	pequena
	<i>Hidrólise</i>	muito significativa	pequena
	<i>Química</i>	muito significativa	pequena
	<i>Raios Ultravioleta</i>	muito significativa	pequena

Os efeitos descritos na Tabela 2.3 podem variar em função das condições de confinamento do geossintético no solo, da temperatura e dos níveis de tensão no material, entre outros fatores. Ressalta-se que a durabilidade e a fluência são afetadas principalmente pelo tipo de polímero, enquanto que as propriedades hidráulicas e a resistência à abrasão, são mais influenciadas pelo processo de fabricação.

2.5.3 – Comportamento Tensão-Deformação dos Polímeros

Segundo Callister Jr. (2002), as propriedades mecânicas dos polímeros são especificadas por muitos dos mesmos parâmetros usados para os metais, isto é, o módulo de elasticidade, o limite de resistência à tração e as resistências ao impacto e à fadiga. As características mecânicas dos polímeros são muito sensíveis à taxa de deformação, à temperatura e à natureza química do ambiente como a presença de água, oxigênio, solventes orgânicos.

São encontrados três tipos de comportamento tensão-deformação tipicamente diferentes nos materiais poliméricos, como está representado na Figura 2.3.

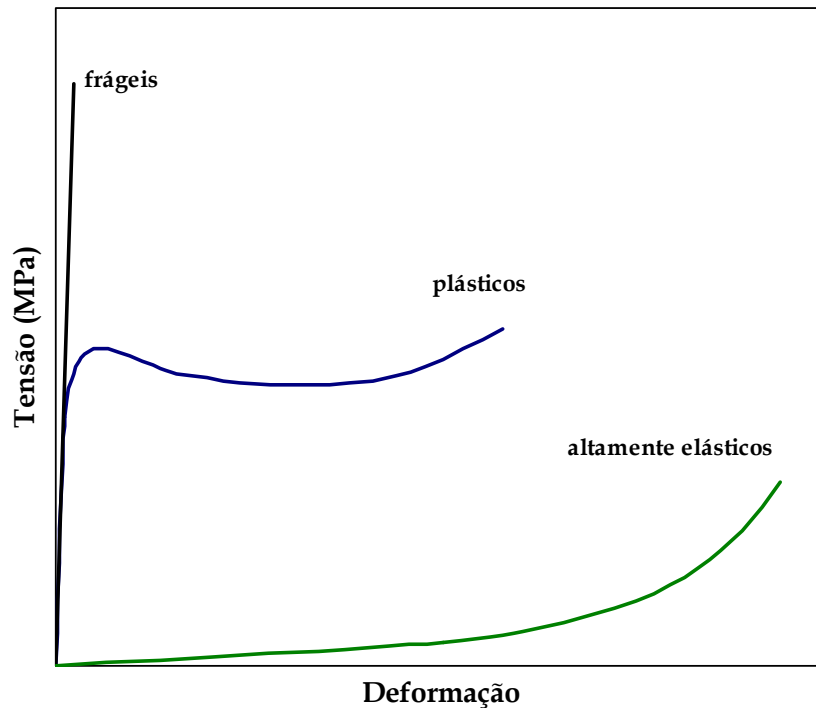


Figura 2.3 - Comportamento tensão-deformação para polímeros (Callister Jr., 2002).

O módulo de elasticidade, chamado de módulo de tração ou, às vezes, somente módulo, no caso dos polímeros, e a ductilidade, em termos do alongamento percentual, são determinados para os polímeros da mesma maneira que para os metais. No caso dos polímeros plásticos (Figura 2.3), o limite de escoamento é tomado como sendo um valor máximo na curva, o que ocorre imediatamente após o término da região elástica linear (Figura 2.4); a tensão nesse ponto máximo é o limite de escoamento, σ_1 . O limite de resistência à tração, LRT corresponde ao nível de tensão no qual a fratura ocorre (Figura 2.4); o limite de resistência à tração pode ser maior ou menor do que o limite de escoamento, σ_1 . A resistência, no caso desses polímeros plásticos, é tomada normalmente como sendo o limite de resistência à tração.

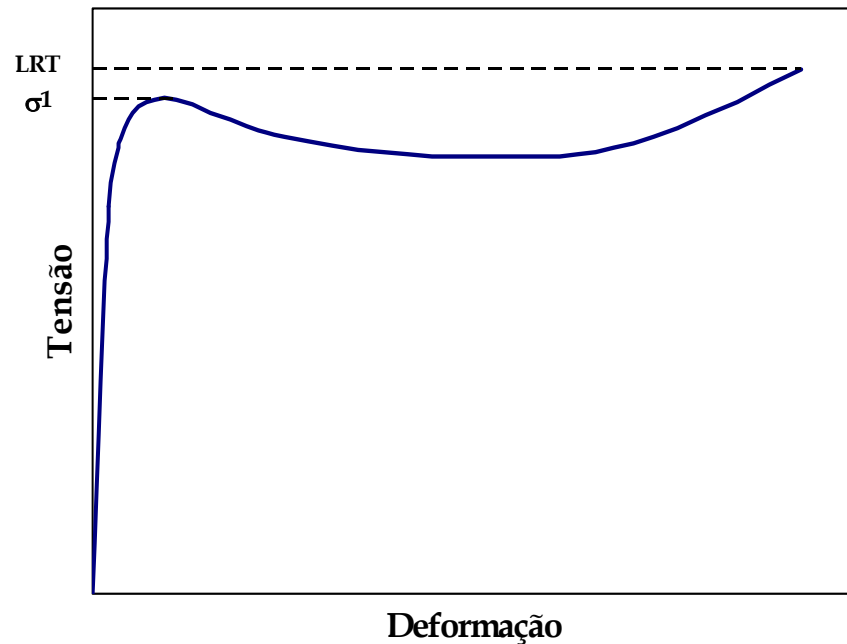


Figura 2.4 - Curva esquemática tensão-deformação para um polímero plástico mostrando como os limites de elasticidade e de resistência à tração são determinados (Callister Jr., 2002).

As características mecânicas dos polímeros são muito mais sensíveis à mudanças de temperatura próximas à temperatura ambiente. A influência da taxa e deformação sobre o comportamento mecânico também pode ser importante. Em geral, uma diminuição da taxa de deformação apresenta a mesma influência sobre as características tensão-deformação que um aumento da temperatura, isto é, o material se torna mais mole e mais dúctil.

O comportamento tensão-deformação dos polímeros, constituintes dos geossintéticos, influencia diretamente o comportamento tensão-deformação dos geossintéticos. Isto pode ser visto na figura 2.5 que mostra curvas características de ensaios de tração não-confinada em geotêxteis, com conformações próximas às das curvas dos polímeros.

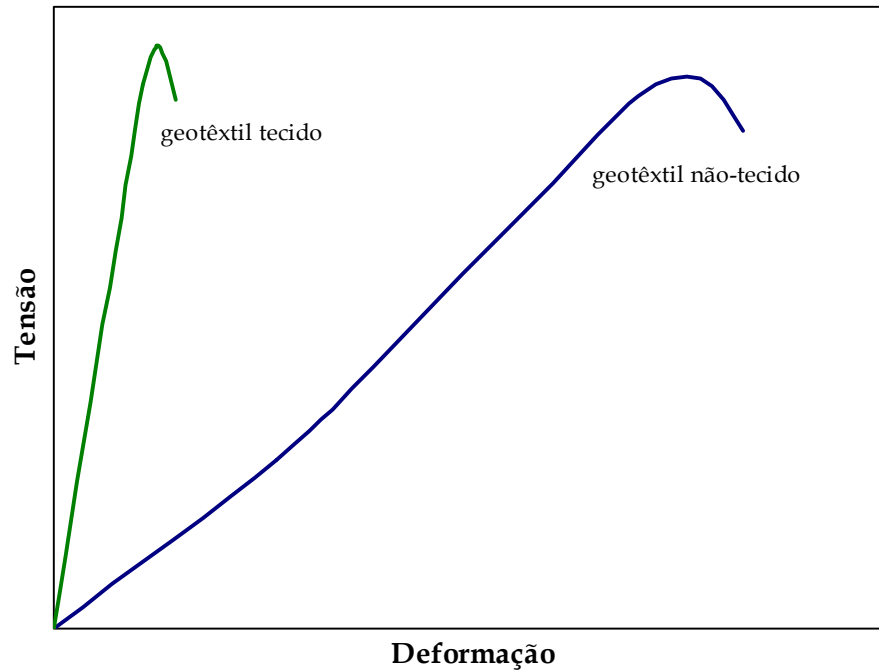


Figura 2.5 - Comportamento tensão-deformação para geotêxteis.

2.5.4 - Comportamento Reológico dos Polímeros

O comportamento reológico dos polímeros não atende à lei da viscosidade de Newton, ou seja, a viscosidade não é constante. Desta forma, os polímeros se comportam como fluidos não-newtonianos. A viscosidade pode diminuir com o aumento das tensões cisalhantes, viscosidade estrutural, ou pode aumentar com o aumento das tensões cisalhantes, dilatância (Castro, 1999). De acordo com Greenwood e Myles (1986), existem sistemas onde a viscosidade não depende somente da magnitude das forças cisalhantes, mas também da duração destas forças.

Com isso, existe uma preocupação significativa quanto às características de fluência apresentadas pelos geossintéticos, referentes à aptidão do material ao alongamento sob carregamentos estáticos de longa duração (McGown *et al.*, 1982; Fannin e Hermann, 1990; Rimoldi e Montanelli, 1993, Lord *et al.*, 1993).

O fator de redução para a fluência é usualmente calculado pela razão entre a carga de ruptura convencional, obtida em ensaios rápidos, e a carga que leva um material a romper por fluência (Berg, 1993).

2.5.5 – Aditivos para Polímeros

Além da resina básica, os geossintéticos contêm aditivos que possuem a função de introduzir melhorias nos processos de fabricação ou modificar aspectos do comportamento do polímero básico. A seguir, são apresentados tipos de aditivos utilizados na fabricação de geossintéticos, segundo Callister Jr. (2002).

- **Enchimentos:** Os materiais de enchimento ou de carga são adicionados aos polímeros para melhorar o limite de resistência à tração e à compressão, a resistência à abrasão, tenacidade, a estabilidade dimensional e térmica, além de outras propriedades.
- **Plasticizantes:** A flexibilidade, a ductilidade e a tenacidade dos polímeros podem ser melhoradas com o auxílio de aditivos conhecidos por plasticizantes. A presença desses aditivos produz reduções na dureza e na rigidez. Os plasticizantes são usados em polímeros intrinsecamente frágeis à temperatura ambiente, tais como o cloreto de polivinila e alguns dos copolímeros de acetato.
- **Estabilizadores:** Alguns materiais poliméricos, sob condições ambientais normais, estão sujeitos a uma rápida deterioração, geralmente em termos de sua integridade mecânica. Essa deterioração é um resultado da exposição do material à luz, em particular à radiação ultravioleta, e também à oxidação. A radiação ultravioleta interage com as ligações covalentes ao longo da cadeia, causando o seu rompimento, o que pode também resultar na formação de ligações cruzadas. A deterioração por oxidação é uma consequência da interação química entre átomos de oxigênio e as moléculas de polímeros. Os aditivos que atuam contra esses processos de deterioração são chamados estabilizadores.

Substâncias antioxidantes são adicionadas nas poliolefinas para truncar a sequência de reações de oxidação. Os antioxidantes primários são aditivos estabilizadores que previnem a dissociação do hidrogênio ou inibem as reações da fase de propagação e ramificação dos hidroperóxidos. Os antioxidantes secundários são substâncias que eliminam os hidroperóxidos. Uma combinação adequada de antioxidantes primários e secundários proporciona às poliolefinas uma estrutura mais estável, mas a eficiência dos

aditivos estabilizadores está relacionada com a distribuição homogênea ao longo das fibras e com a estabilidade à lixiviação (Van Zanten, 1986).

- **Corantes:** Os corantes conferem uma cor específica a um polímero. Eles podem ser adicionados na forma de tintura ou pigmentos. As moléculas em uma tintura se dissolvem e se tornam parte da estrutura molecular do polímero. Os pigmentos são materiais de enchimento que não se dissolvem, mas permanecem como uma fase separada. Normalmente, os pigmentos possuem um pequeno tamanho de partícula, são transparentes, e possuem um índice de refração próximo daquele do polímero onde são adicionados. Os pigmentos também podem conferir opacidade e cor ao polímero.
- **Retardadores de chama:** A maioria dos polímeros é inflamável na sua forma pura; as exceções são aqueles que contêm teores significativos de cloro e/ou flúor, tais como o cloreto de polivinila e o politetrafluoroetileno. A resistência à inflamabilidade dos demais polímeros combustíveis pode ser melhorada por aditivos chamados retardadores de chama. Esses retardadores podem funcionar pela interferência no processo de combustão através da fase gasosa ou pela iniciação de uma reação química que cause um resfriamento da região de combustão e um encerramento da queima.

Desta maneira, pode-se observar que os produtos constituídos por polímeros têm suas propriedades melhoradas pela incorporação de aditivos, cuja função é minimizar a intensidade dos fenômenos degradativos.

Capítulo 3 - DEGRADAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em maior ou menor grau, a maioria dos materiais de construção experimenta algum tipo de interação com ambientes exógenos. Com frequência, tais interações comprometem a utilidade do material como resultado da deterioração das propriedades mecânicas, por exemplo, ductilidade e resistência, das propriedades físicas, e/ou aparência. Ocasionalmente, a degradação de um material de construção, para uma dada aplicação, é ignorada, o que resulta em consequências adversas, para o pesar de um engenheiro de projetos.

Os mecanismos de deterioração ocorrem de forma diferente, dependendo fundamentalmente do tipo de material. Nos metais, existe uma perda efetiva do material, seja por dissolução (corrosão) ou pela formação de uma incrustação ou película de material não-metálico (oxidação). Os materiais não-metálicos são relativamente resistentes à deterioração, que ocorre geralmente a temperaturas elevadas ou em meio a ambientes considerados extremos. Com frequência este processo também é chamado de corrosão. No caso dos polímeros, como materiais constituintes dos geossintéticos, os mecanismos e as consequências são diferentes daqueles apresentados pelos materiais metálicos e pelos não-metálicos, e o termo degradação é usado com maior frequência. Os polímeros podem se deteriorar por inchamento e por dissolução. A ruptura de ligações covalentes na cadeia polimérica, como resultado da ação da energia térmica, de reações químicas, e da radiação é possível, normalmente com uma concomitante redução na integridade mecânica.

Deste modo, a degradação dos geossintéticos pode ser entendida como qualquer reação química destrutiva dos polímeros, que pode ser causada por agentes físicos, químicos e/ou biológicos (Matheus, 2002). A degradação causa uma modificação irreversível nas propriedades dos materiais poliméricos, sendo evidenciada pela deterioração progressiva de suas propriedades, incluindo o seu aspecto visual.

A degradação dos geossintéticos está relacionada à durabilidade e ao comportamento a longo prazo destes em obras civis, que podem ser avaliados de três maneiras, segundo Abramento (1995a):

- por meio da avaliação do desempenho do material durante e após a sua utilização (exumação e ensaios);
- por meio de simulações em laboratório;
- por meio da verificação da durabilidade do polímero constituinte a partir de métodos utilizados em outras áreas industriais, onde também se utilizem materiais poliméricos.

3.1.1 – Agentes de Degradação

A degradação de um material polimérico pode ser causada pela ação de um ou mais agentes. Nas degradações por agentes combinados, a análise fica muito complexa, caracterizando, em geral, situações muito severas. Os principais agentes de degradação dos materiais poliméricos são:

- **Agentes físicos:** radiação solar e outras radiações (raios α , β e γ), temperatura e atrito mecânico intenso (danos mecânicos).
- **Agentes químicos:** água, ácidos, bases, solventes e outros agentes químicos, oxigênio, ozônio e poluentes atmosféricos.
- **Agentes biológicos:** microorganismos, tais como fungos e bactérias (Agnelli, 1999).

Além desses, Koerner *et al.* (1990) ainda apresenta como agentes de degradação de materiais poliméricos a expansão por absorção de líquidos, extração de um ou mais componentes do material polimérico e oxidação.

3.1.2 – Mecanismos de Degradação dos Polímeros

Dos seis mecanismos de degradação de produtos poliméricos que serão apresentados a seguir, apenas três deles, degradação por raios ultravioleta, degradação pela temperatura e degradação por hidrólise, serão objetos desta pesquisa. No entanto a título de informação os outros tipos de degradação serão brevemente comentados.

3.1.2.1 – Degradação pela Radiação Ultravioleta

Existem muitas evidências que o mais importante fator ambiental responsável pela degradação dos materiais poliméricos é a radiação solar, especialmente a radiação ultravioleta presente no espectro solar (Rosa, 1996).

Para quantificar a luz solar como agente de degradação, existem medidas baseadas em três variáveis:

- Taxa de insolação
- Radiação solar total
- Radiação ultravioleta

Dentre estas, a mais importante e usual é a medida da quantidade de radiação solar total incidente, que depende da latitude e da estação do ano.

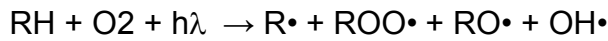
A degradação provocada pela radiação ultravioleta é também chamada de fotodegradação ou foto-oxidação.

A foto-oxidação somente pode ocorrer quando o polímero em questão contém cromóforos (Gijsman *et al.*, 1999), que podem ser definidos como compostos que têm a capacidade de absorver energia na faixa de comprimentos de onda da radiação solar. Esta energia é suficiente para causar um processo dissociativo na molécula do polímero tendo como resultado a degradação da cadeia polimérica e formação de radicais livres. Alguns dos cromóforos são, segundo Gijsman *et al.* (1999).

- impurezas internas das cadeias poliméricas, como carbonilas ($>C=O$) e hidroperóxidos ($-ROOH$), que são formadas durante o armazenamento, processo de fabricação ou intemperismo;
- impurezas externas como resíduos do catalisador da polimerização, aditivos (pigmentos ou antioxidantes), poluidores da atmosfera ou traços do equipamento de extrusão.

Os polímeros reagem de maneira diferente à fotodegradação, podendo-se ter variações de sensibilidade a tal efeito, que resultam das diferenças em suas estruturas moleculares e composições químicas.

A degradação ultravioleta no polietileno PE e polipropileno PP é controlada por uma série de reações envolvendo radicais livres (Equação 1).



Equação 3.1

onde, RH é a cadeia polimérica, $h\lambda$ é a energia de um fóton com h representando a constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-27}$ ergs.s), λ representando o comprimento de onda e, $R\cdot$, $ROO\cdot$, $RO\cdot$ e $OH\cdot$ são os radicais livres com R representando a cadeia polimérica. A reação oxidativa conduz à cisão nas cadeias. A energia necessária para gerar radicais livres em poliolefinas é menor do que a necessária para a quebra de suas cadeias. Isso faz com que as poliolefinas sejam mais susceptíveis à degradação ultravioleta do que outros tipos de polímeros.

A literatura apresenta que o comprimento de onda de 400 nm é o limite superior para ultravioleta UV-A, e que é geralmente aceito como o limiar entre as regiões de luz ultravioleta e a região de luz visível. O valor de 315 nm se apresenta como o separador das duas regiões do ultravioleta UV-A e UV-B, pois define o ponto no qual a energia ultravioleta começa a causar vários efeitos e mudanças de pigmentação da pele humana. Por fim, o valor de 290 nm se apresenta como o limite inferior do ultravioleta UV-C, pois a camada de ozônio presente na atmosfera terrestre absorve totalmente a radiação solar nesta faixa do ultravioleta (Agnelli, 1999) (Figura 3.1).

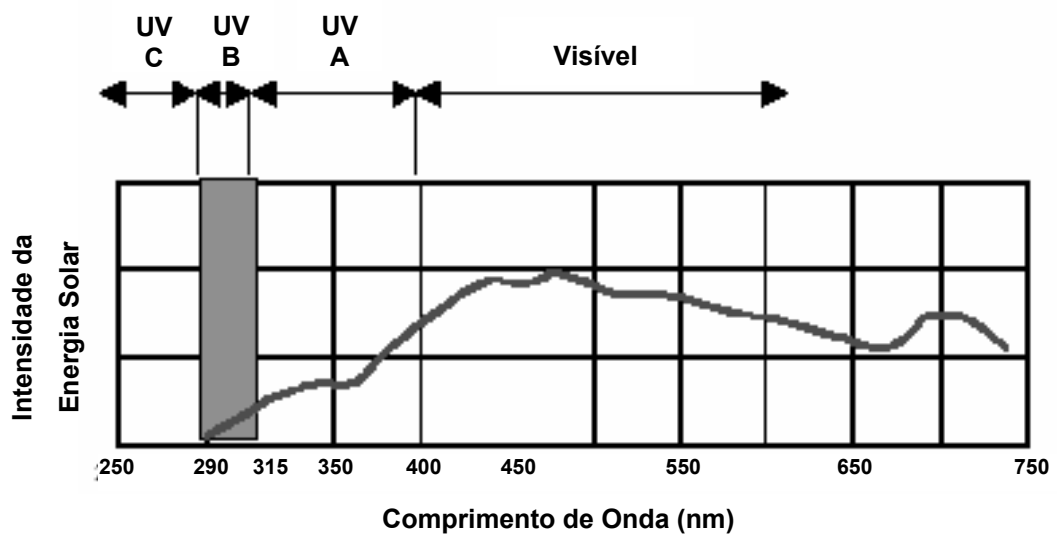


Figura 3.1 - Variação da intensidade da energia solar em função do comprimento de onda do espectro solar na região UV (Rosa, 1996 - Modificado).

Segundo Koerner (1994), os raios ultravioleta UV-A causam alguns danos nos polímeros; os raios ultravioleta UV-B, causam severos danos nos polímeros e os raios ultravioleta UV-C, conforme citado, não atingem a superfície da terra.

Rosa (1996) comenta que a maior parte da luz emitida pelo sol (cerca de 99% da emissão) não possui energia suficiente para romper as ligações químicas e causar degradação fotoquímica. A faixa de radiação solar capaz de provocar essa degradação é a ultravioleta UV-B, que corresponde a 0,1 % da energia total da luz solar (no inverno o ultravioleta UV-B é apenas de 0,05 % do total e no verão cerca de 0,2 %), como mostra a Figura 3.2.

Segundo Koerner (1992), a faixa de comprimentos de ondas dos raios ultravioleta que causa grandes danos aos geossintéticos está entre 300 a 370 nm, sendo que o polietileno PE é o mais sensível aos raios ultravioleta na faixa de 300 nm, seguido do poliéster PET na faixa de 325 nm e do polipropileno PP na faixa de 370 nm (Figura 3.2).

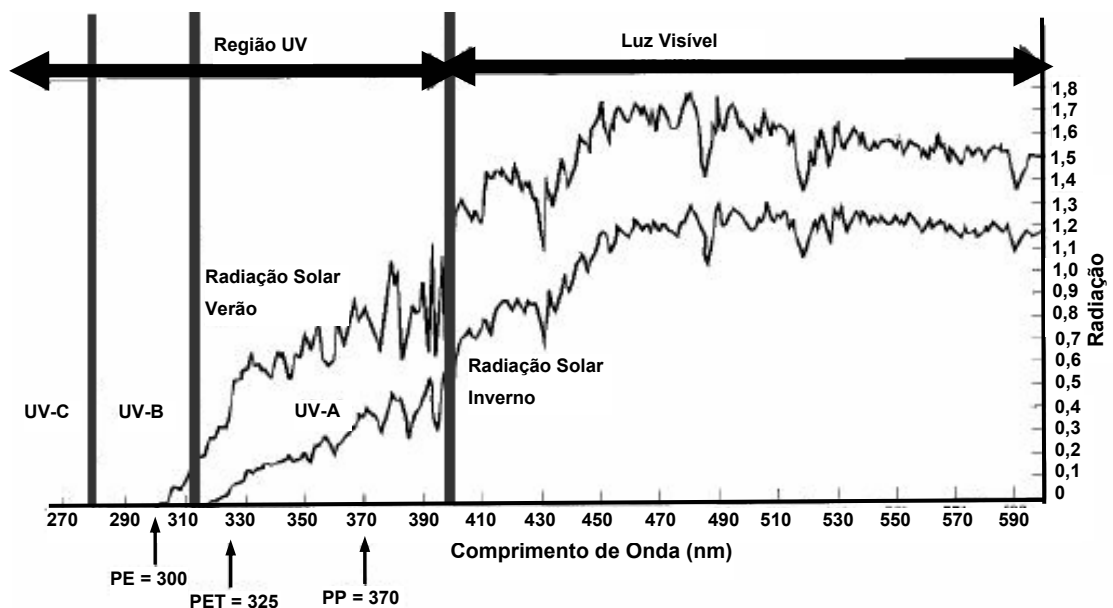


Figura 3.2 - Comprimento de onda da Radiação Solar no espectro visível e no ultravioleta (Koerner, 1994 – Modificado).

Vários ensaios têm sido realizados para quantificar a intensidade dos danos causados a materiais poliméricos, chegando-se a resultados que demonstram haver boas correlações entre perda de resistência para situações de campo e laboratório. Os ensaios também mostram que cerca de 2000 horas de exposição aos raios ultravioleta UV-B degradam completamente polímeros tais como o poliéster e o

polipropileno, e ainda que, fatores como estrutura das fibras dos geotêxteis e espessuras de geomembranas e geogrelhas são importantes e podem influenciar mais que aditivos, visto que a degradação por radiação ultravioleta atinge os materiais em uma camada superficial (Cazzuffi *et al.*, 1994).

Existem alguns ensaios acelerados de degradação utilizados em laboratório para a estimativa da vida útil após exposição à radiação ultravioleta (ASTM G26 e ASTM D4355). Avaliações do desempenho mediante exposições à intempérie podem ser realizadas por meio de métodos de ensaios como a ASTM D1435, D3334 ou D5970. Suits & Hsuan, em 2003, especificam os métodos ASTM D5970 e D4355 e o método de ensaio GM11 do GRI (*Geosynthetics Research Institute*) para a avaliação da fotodegradação de geossintéticos. O método de ensaio GM11 utiliza lâmpadas fluorescentes com emissão de raios ultravioleta e apresenta uma pequena diferença nos ciclos de ensaio quando comparado à metodologia proposta no método ASTM G53 (atual G154). Koerner *et al.* (1998), avaliaram diferentes tipos de geotêxteis (polipropileno PP e poliéster PET) em dois experimentos de laboratório (equipamentos com lâmpadas fluorescentes e de arco de xenônio) e concluíram que o equipamento que utilizou lâmpadas de arco de xenônio apresentou uma taxa de degradação superior a do equipamento com lâmpadas fluorescentes (Matheus, 2002).

Destaca-se que, no caso dos geotêxteis e geogrelhas, ambos trabalham freqüentemente enterrados, não havendo exposição à radiação ultravioleta. No entanto, observação importante deve se aplicar a esses materiais com relação ao tempo de exposição durante o período de instalação.

3.1.2.2 – Degradação pela Temperatura

Os efeitos da temperatura, apresentados a seguir, levam em conta a presença de oxigênio.

Também chamada de termo-oxidação, ocorre devido às reações causadas pela formação de radicais livres nas moléculas, freqüentemente a partir da dissociação de um átomo de hidrogênio da cadeia principal do polímero. Como consequência dessa dissociação, ocorre uma propagação de reações com a formação de radicais hidroperóxidos de rápida decomposição, causando a cisão das ligações covalentes carbono-carbono. Juntamente com as alterações nas propriedades do polímero, é

bastante comum ocorrer alterações de coloração, causadas pela oxidação (Abramento, 1995b e Agnelli, 1999).

Em geral, os materiais geossintéticos não apresentam grandes problemas relacionados à temperatura do ponto de vista de degradação, a menos que sejam submetidos a altas temperaturas de trabalho, como por exemplo, nas aplicações rodoviárias do geotêxtil impregnado com asfalto muito quente. Neste caso, podem ocorrer mudanças de comportamento de suas propriedades mecânicas ao longo do tempo, principalmente a relação carga-deformação. Caso essas mudanças ocorram, a estrutura molecular do geotêxtil é afetada e conseqüentemente, sua resistência e sua rigidez (Matheus, 2002).

Se o material é exposto ao calor por um longo período de tempo suas propriedades físicas ficam comprometidas, como é o caso do polipropileno PP, devido ao próprio processo de fabricação de suas fibras. O polipropileno é extrudado a quente, o que orienta suas moléculas e as coloca sob um dado estado de tensão. Fibras de polipropileno expostas por longo período ao calor podem sofrer termo-oxidação, o que resulta numa diminuição da resistência das fibras. Quando isto acontece, a ligação carbono-hidrogênio, C-H do carbono terciário (composição molecular), torna o polímero mais sensível a termo-oxidação do que o polietileno de alta densidade, PEAD (Abramento, 1995b). A termo-oxidação pode ser minimizada, ou até mesmo evitada, com o uso de antioxidantes adicionados antes da extrusão da fibra do polipropileno PP e do polietileno de alta densidade PEAD.

A temperatura, além de ser a responsável pela ativação da oxidação, é também a responsável pela velocidade da degradação. Os ensaios desenvolvidos para este caso, também chamados de envelhecimento acelerado, consistem basicamente em se colocar uma amostra em uma estufa com temperatura controlada. A temperatura é aumentada gradativamente até que ocorra a deterioração da amostra, definida pela alteração na aparência, peso, dimensão ou outras propriedades características dos geossintéticos (Koerner, 1994).

Outro ensaio, semelhante ao descrito acima é realizado com uma temperatura constante. Para alguns polímeros a temperatura utilizada é igual à sua temperatura de transição vítrea, que é a temperatura a partir da qual o material amorfo readquire gradualmente sua mobilidade. A temperatura é aplicada por um determinado intervalo de tempo, geralmente até que a propriedade principal do polímero analisado se modifique. Os dados de tempo, temperatura e resistência são inseridos

no modelo de Arrhenius e extrapolados para tempos longos. Tem-se, então, uma previsão do tempo que aquele material a uma temperatura ambiente, geralmente considerada igual a 20 °C, vai levar para ter sua resistência diminuída de 50 %. Este ensaio é normalizado pela norma UL 746 B, 1979 - *Polymeric Materials – Long Term Property Evaluations* (Matheus, 2002).

Den Hoedt (1988), citado por Matheus (2002), afirma que a velocidade de termo-oxidação do polipropileno PP, quando exposto à atmosfera, é quatro vezes maior do que quando ele se encontra submerso.

Giroud e Peggs (1990) afirmam que as geomembranas em campo podem estar sujeitas a uma grande variação de temperatura, desde baixíssimas temperaturas no inverno a altas temperaturas no verão, como por exemplo, em regiões no Oeste dos USA, onde foram observadas variações de temperaturas na geomembrana de -35 °C a 90 °C. Os mesmos autores afirmam ainda que é comum, em regiões a Nordeste do USA, medirem-se temperaturas em geomembranas variando de -20 °C no inverno a 75 °C em um mesmo dia ensolarado de verão.

Junqueira & Palmeira (1999) e Junqueira (2000), citados por Matheus (2002), comprovaram por meio de medições em células experimentais em aterros sanitários, que as temperaturas podem ser elevadas no interior da célula, tendo sido medidas temperaturas da ordem de 46 °C.

O conhecimento do envelhecimento sob tais temperaturas pode permitir que se simulem situações com temperaturas intermediárias, ou até mesmo com altas temperaturas, utilizando-se a extrapolação dos resultados.

Bidone & Cotrin (1988) explicam que o aumento da temperatura em aterros sanitários se dá principalmente em função da liberação de calor de microorganismos aeróbicos, que utilizam o alto grau de oxigênio disponível no início do processo de aterramento. Variações de temperatura podem ocorrer em função das mudanças nas condições de oxigênio disponível.

O efeito mais severo da oxidação sobre as fibras poliméricas parece residir na perda de ductilidade. Harrocks e D'Souza (1990) demonstraram que a redução da deformação na ruptura em amostras oxidadas é percentualmente maior que a perda de resistência.

3.1.2.3 – Degradação por Danos Mecânicos

Comumente chamados na literatura de danos de instalação, os danos mecânicos podem ser definidos como todo tipo de alteração que o material sofre devido aos esforços provenientes de manuseio, instalação, compactação de solo sobrejacente e outros tipos de esforços ocorridos durante a fase de serviço. Os danos mais comuns na fase de instalação, ou de serviço dos geossintéticos, são provocados por tráfego de equipamentos pesados sobre os materiais, quedas de objetos cortantes como pedras pontiagudas, emendas mal feitas, furos, abrasões, solicitações por cargas dinâmicas e outros.

Estes danos são avaliados pela exumação de espécimes do material recém instalado e ensaios para comparação dos resultados de resistência mecânica no material intacto. Desta forma pode-se determinar o fator de redução definido pela relação entre a resistência do material intacto e a resistência do material danificado (Matheus, 2002).

Koerner e Koerner (1990), citados por Matheus (2002), realizaram vários estudos com uma série de materiais exumados após o processo de instalação. A exumação foi realizada cerca de 48 horas após a instalação dos materiais e os resultados mostraram que a perda de resistência pode ser comprometedora devido aos danos causados durante o processo de instalação (Figura 3.3).

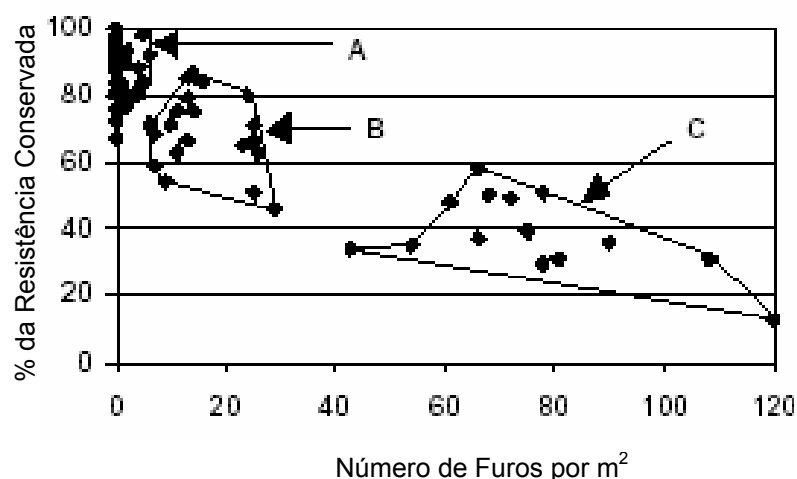


Figura 3.3 - Perda de Resistência devido a Danos Mecânicos na Instalação (Adaptado de Koerner e Koerner, 1990).

Koerner e Koerner (1990) avaliaram os resultados considerando a aceitabilidade dos valores a serem considerados em projetos:

- “**A**” é a região com número de furos de 0 a 6 furos por metro quadrado e resistência conservada de 100 % a 67 %;
- “**B**” é a região mais problemática porque muitas das resistências conservadas são razoáveis e podem ser aceitas em projetos, mas o grande número de furos por metro quadrado pode gerar uma certa insegurança;
- “**C**” é a região inaceitável, uma vez que apresenta baixa porcentagem de resistência conservada e excessivo número de furos por metro quadrado.

Azambuja (1994) também realizou experimentos de inspeção do efeito do dano mecânico gerado pela compactação de solos sobre geossintéticos utilizados em obras de contenção. O autor apresenta considerações e resultados sobre danos mecânicos, apontando que a menor resistência verificada nas amostras de geossintéticos após a compactação do solo, é provocada pela maior intensidade dos danos mecânicos ocorridos durante a fase de instalação (Matheus, 2002).

3.1.2.4 – Degradação Biológica

Em alguns ambientes a ação de microorganismos é mais acentuada do que em outros, como no caso de aterros sanitários, quando o material fica inserido em um ambiente susceptível a vários tipos de agentes microbiológicos. Em geral, os polímeros sintéticos como o polipropileno PP, o polietileno PE, o poliéster PET e a poliamida PA são mais resistentes às ações de microorganismos. Os ensaios existentes nesta área não são aplicados diretamente aos geossintéticos, mas a outros materiais tais como os produtos têxteis e produtos plásticos (Abramento, 1995b).

Vários são os fungos e bactérias que ficam alojados no interior ou na superfície dos geossintéticos. No entanto, não são observadas mudanças significativas de comportamento dos geossintéticos antes e após a permanência em ambiente com a presença de fungos ou bactérias (Matheus, 2002).

Segundo Matheus (2002) pesquisas estão sendo desenvolvidas para o estudo da degradação biológica de geossintéticos, pois ainda se sabe muito pouco sobre o

risco de degradação em condições reais em campo. Além disto, as fontes de degradações, além de por vezes desconhecidas, podem ser diversas, sendo diversas também suas formas de atuação (Abramento, 1995b).

3.1.2.5 – Degradação Química

A resistência do geotêxtil à degradação química é um fator muito importante na durabilidade. Condições ambientais que contribuam para a degradação química, onde se incluem gases e vapores em contato com o geotêxtil, tais como oxigênio e vapor d'água, acidez e alcalinidade presentes no solo e ainda exposição desses materiais a raios ultravioleta e condições térmicas, já vistas anteriormente, podem alterar a composição química dos geossintéticos e influenciar o seu comportamento. Outras condições ambientais severas, como locais de disposições de resíduos sólidos ou líquidos, devem merecer atenção particular.

Ainda se necessita de padronização de ensaios que possam avaliar a estabilidade química dos geossintéticos, tais como ASTM 5322 (*Chemical Immersion*), ASTM D5496 (*Field Immersion*) e ASTM D543 (*Resistance of Plastic to Chemical Reagents*) (Matheus, 2002). Koerner (1992) recomenda que caso o geossintético seja submetido a um ambiente químico capaz de atacar o polímero constituinte como no caso de chorumes, acidez, alcalinidade, hidrocarbonetos, as amostras sejam mergulhadas no produto ou ambiente em questão e posteriormente sejam analisadas as propriedades mais importantes e comparadas com as propriedades antes da imersão. A compatibilidade química deve ser analisada com muita atenção de forma a reproduzir uma condição mais próxima possível da condição de campo.

Testes relacionados a este tipo de estudo, além de exigirem uma acurácia muito grande, exigem a determinação de várias outras condicionantes como, por exemplo:

- possuir instalações e equipamentos adequados para realização de ensaios envolvendo a utilização de produtos químicos;
- dispor de tempo hábil e adequado para exposição das amostras de maneira que se possa ter uma boa avaliação dos resultados;
- determinação do tipo de reagente químico ideal para análise do processo de degradação para cada tipo de geossintético;

- realizar a inclusão de variáveis de aceleração, como temperatura e/ou algum tipo de solicitação mecânica.

3.1.2.6 – Degradação por Hidrólise

A hidrólise se dá com a ruptura das cadeias moleculares poliméricas pela ação de moléculas de água. Com o passar do tempo, os polímeros geralmente apresentam uma tendência à absorção de água. O polímero mais suscetível a esse tipo de degradação é a poliamida PA, seguida do poliéster PET e, por último, o polipropileno PP e o polietileno de alta densidade PEAD em igual escala (Abramento, 1995b).

Os ensaios de degradação por hidrólise utilizam técnicas de concentração e temperaturas elevadas para se acelerar o processo, como, por exemplo, a análise da perda de resistência de geotêxtil não-tecido de poliéster por hidrólise em meio alcalino ou por hidrólise em outros tipos de ambientes degradantes, comparando-se amostras virgens com amostras degradadas (Matheus, 2002).

Abramento (1995b) afirma que em ambiente neutro não há problema de degradação, porém em ambientes altamente ácidos ou alcalinos a degradação por hidrólise pode acontecer.

3.2 – PROCEDIMENTOS DE DEGRADAÇÃO

Ocorrendo a degradação do material com o tempo pode-se quantificar o nível de deterioração e o conseqüente nível de redução das propriedades iniciais.

Rosa (1996) ressalta que os polímeros apresentam uma gama de propriedades e em muitas aplicações estão sujeitos ao intemperismo. Assim, como os ensaios de ação do intemperismo se baseiam em causa e efeito, nem sempre é tão simples se identificar a causa, uma vez que ela está ligada ao meio onde o material está inserido, requerendo preparação e planejamento adequados, inerentes às características intrínsecas do material.

Quando o procedimento de degradação é realizado colocando-se os materiais em contato direto com o meio natural, denomina-se Degradação Natural, que está associada ao processo de intemperismo natural. Quando o procedimento de degradação é realizado sob condições de laboratório, denomina-se Degradação Acelerada, associado ao processo de intemperismo artificial. Neste caso, procura-se

reproduzir as condições reais de campo no laboratório para que seja possível correlacionar os resultados obtidos no laboratório com os resultados encontrados no meio natural.

3.2.1 – Degradação Natural

Ranby e Rabek (1975), citados por Rosa (1996), relatam que as primeiras exposições de polímeros ao meio ambiente foram realizadas utilizando-se materiais durante suas aplicações, tendo sido considerado a princípio, como fator básico da avaliação, apenas a localização geográfica. À medida que a pesquisa avançava, outros fatores, tais como a direção da exposição da amostra à radiação solar e o ângulo de inclinação destas amostras, passaram a ser levados em conta. A partir de então surgiram vários métodos para a avaliação da resistência de materiais expostos ao meio ambiente, geralmente destinados a aplicações específicas.

Segundo Ranby e Rabek (1975), os métodos de determinação da resistência ao intemperismo natural devem levar em conta duas situações muito importantes. A primeira é a determinação dos agentes externos que degradam o polímero e a segunda é a composição de uma série de medidas físico-químicas e mecânicas para se estabelecer um critério adequado para a avaliação da degradação.

Quando se fala em agentes externos deve-se levar em conta o conjunto de fatores atuantes, concomitantemente ou não, que degradará o material, isto é, a ação dos raios ultravioleta, do vento, da umidade, do frio, do calor, da chuva, podendo em certos locais ser chuva ácida, entre outros. Tais fatores e a sua repetibilidade determinarão a degradação do material. Desta maneira, para que se obtenham bons resultados de degradação natural dos materiais, a seleção do local de exposição e a forma de disposição das amostras são muito importantes.

É importante ressaltar, também, que outros cuidados, tais como a seleção e tamanhos ideais de amostras, ângulo de exposição das amostras, tempo de exposição, intervalo de retiradas das amostras e dados meteorológicos devem ser observados e realizados de acordo com as normas de ensaios ASTM-D-1435, DIN 53386, DIN 53388, ISSO 877 E ISSO 4607, por exemplo, que mesmo não estando internacionalmente uniformizadas, seguem alguns procedimentos padrão (Rosa, 1996).

A literatura internacional apresenta algumas citações sobre pesquisas realizadas em Hong Kong e Peru, entre outras, com degradação natural em ambiente exógeno de

espécimes de geotêxteis (Matheus, 2002). Resultados interessantes são apresentados sobre as pesquisas, onde os autores relatam que a perda de resistência dos materiais cresce com a intensidade da radiação solar, com a temperatura e com o tempo de exposição, condições essas que dependem da latitude e da estação do ano. Os autores apresentam ainda várias considerações com relação aos condicionantes dos ensaios, semelhantes àsquelas descritas no parágrafo anterior, além de apontar algumas recomendações aos projetistas para que levem em conta o possível tempo de exposição aos raios ultravioleta aos quais os geossintéticos estarão sujeitos durante as obras.

No aspecto mais prático da avaliação dos mecanismos de degradação natural, ressalta-se a exumação de amostras do material utilizado em obras como sendo o mais eficiente modo de verificação da degradação. Vários autores, tais como Sutton *et al.* (1982) e Koerner (1994), reportam a utilização desse tipo de método de avaliação apresentando resultados com reais alterações das propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais exumados.

3.2.2 – Degradação Acelerada em Laboratório

Também chamada de degradação artificial, a degradação acelerada é realizada em laboratório procurando-se simular condições ambientais adversas por meio dos componentes elementares: luz ultravioleta, calor, umidade e oxigênio, que atuam sobre os materiais provocando a degradação. Com esse tipo de procedimento, é possível um melhor entendimento do comportamento dos materiais ao longo do tempo.

Segundo Rosa (1996), não existe um consenso quanto à degradação acelerada em laboratório, pois alguns opositores a esse tipo de procedimento argumentam que a diversidade de condições encontradas na natureza e suas interações com o material são as maiores razões para a complexidade dos processos de degradação. Desta forma, as condições escolhidas em laboratório produzem apenas algumas condições peculiares. Porém, cabe ressaltar que os testes de degradação artificial, quando comparados com aqueles encontrados em campo, em situações reais de uso, podem produzir boas correlações que auxiliam na definição da vida útil do material em obras.

3.2.3 – Procedimentos de Degradação Acelerada em Laboratório

Ao longo dos anos têm sido desenvolvidos vários tipos de equipamentos visando a simulação de condições ambientais diversas. Esses equipamentos podem ser desde uma simples bancada para ensaios de choque térmico até complexas instalações automáticas, usadas para avaliação do comportamento de materiais pela ação em conjunto ou individual de umidade, calor, luz e agentes atmosféricos diversos (Rosa, 1996). Nesta pesquisa, os procedimentos de degradação acelerada no laboratório são exposição à radiação ultravioleta, lixiviação contínua e ciclos de saturação e secagem.

3.2.3.1 – Radiação Ultravioleta

Rosa (1996) e Agnelli (1999) relatam que dados históricos apontam 1915 como o ano em que houve o aparecimento das primeiras fontes luminosas artificiais, do tipo arco de carvão fechado, primeiramente utilizadas na indústria têxtil, artes gráficas e posteriormente na área de tintas, principalmente para avaliação da resistência à luz (solidez à luz). Essas fontes luminosas apresentavam faixa espectral com acentuada concentração de radiação ultravioleta nos comprimentos de onda de 360, 385 e 415 nanômetros. Posteriormente, no início da década de 30, a Companhia *National Carbon – USA*, desenvolveu o sistema de iluminação conhecido como *Sunshine Arc*, ou como comumente era chamado, Arco de carvão solar. Seu espectro atingia a faixa inferior do espectro ultravioleta excedendo àquela encontrada na fonte do tipo de arco de carvão fechado. Para a filtragem do espectro abaixo de 270 nanômetros, a lâmpada de arco solar emprega filtros do tipo *Corex*. Em meados de 1952, foi introduzido pela Companhia *Atlas Electric*, nos *USA*, um novo conceito de operação de fonte luminosa, onde os sistemas de luz anteriormente vistos passavam a operar dentro de uma cabine ou câmara na qual circulava um fluxo de ar, de maneira a manter alguns graus de variação da temperatura e da umidade, mas com base contínua. Desta forma, foi incorporado ao aparelho um dispositivo de condicionamento, permitindo que aquecedores de água e um umidificador, atuando em conjunto com uma válvula de regulação de ar, controlassem as condições internas da câmara. As experiências e estudos realizados por vários pesquisadores levaram ao aparecimento de outros tipos de fontes luminosas. Contudo, foi a descoberta do Sistema de Arco de Xenônio que

mais proporcionou condições comerciais de acessibilidade e com características técnicas capazes de simular a luz solar em laboratório. A principal vantagem do equipamento é que, por meio de filtros selecionados, o Arco de Xenônio produz baixas concentrações de radiação ultravioleta, atuando com frequência de corte em torno de 190 nanômetros.

Os testes atuais são realizados em equipamentos denominados *Weather-Ometer*, os quais reproduzem condições climáticas semelhantes às encontradas na natureza. Assim, as amostras dos materiais poliméricos são submetidas a ciclos de exposição com luz, temperatura e umidade.

Existem alguns ensaios acelerados de degradação utilizados em laboratório para a estimativa da vida útil após exposição à radiação ultravioleta (ASTM G26 e ASTM D4355). Avaliações do desempenho mediante exposições à intempérie podem ser realizadas por métodos de ensaios como a ASTM D1435, D3334 ou D5970 (Koerner, 1998). Suits & Hsuan (2003), citados por Matheus (2002), especificam os métodos ASTM D5970 e D4355 e o método de ensaio GM11 do GRI (*Geosynthetics Research Institute*) para a avaliação da fotodegradação de geossintéticos. O método de ensaio GM11 utiliza lâmpadas fluorescentes com emissão de raios ultravioleta e apresenta uma pequena diferença nos ciclos de ensaio quando comparado à metodologia proposta no método ASTM G53 (atual G154). Koerner *et al.* (1998) avaliaram diferentes tipos de geotêxteis (polipropileno PP E poliéster PET) em dois experimentos de laboratório (equipamentos com lâmpadas fluorescentes e de arco de xenônio) e concluíram que o equipamento que utilizou lâmpadas de arco de xenônio apresentou uma taxa de degradação superior a do equipamento com lâmpadas fluorescentes.

Os detalhes e as técnicas do procedimento de degradação do equipamento com lâmpadas fluorescentes, C-UV B (condensação e radiação ultravioleta B), adotado nesta pesquisa, são apresentados no Capítulo 4.

3.2.3.2 - Lixiviação Contínua

O equipamento mais utilizado para ensaios de lixiviação contínua é o extrator Soxhlet. O equipamento Soxhlet 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. O equipamento convencional é constituído por manta aquecedora, balão, tubo extrator e tubo condensador (Figura 3.4). Dentro do balão

coloca-se a solução de lixiviação, que pode ser monitorada e, se necessário, trocada durante o ensaio. Durante o ensaio a manta aquece a solução e produz vapor que é conduzido ao topo do tubo extrator através do tubo condutor de vapor. O vapor é condensado no tubo condensador, localizado no topo do tubo extrator.

No tubo extrator, a amostra é submetida a três diferentes condições de alteração. Na primeira, o material é submetido a variações de temperatura, enquanto é lavado continuamente pela solução condensada. Esta condição ocorre no trecho superior do tubo extrator. A solução que passa pelo primeiro trecho é acumulada no fundo do tubo extrator. Quando o nível da solução no tubo extrator atinge determinado ponto, ocorre o rebaixamento da solução de lixiviação através do sifão. A solução sifonada retorna para o balão. O tempo entre os períodos de rebaixamento é controlado pela temperatura da manta ajustada pelo termostato. O nível final da solução após o rebaixamento é controlado pela quantidade de solução no equipamento ou pela posição da saída do sifão do tubo extrator. A segunda condição de alteração corresponde a variações do nível da solução de lixiviação, que ocorrem no trecho central do tubo extrator. A terceira condição é de submersão permanente e ocorre no trecho inferior do tubo extrator. A variação de temperatura imposta à amostra e correspondente às três condições de alteração é semelhante. A temperatura média durante os ensaios é da ordem de 80°C. O material permanentemente submerso (terceira condição) sofre níveis de alteração inferiores aos do material nas duas primeiras condições (Minette, 1982). Assim, a fim de obter uma maior eficiência, os equipamentos Soxhlet convencionais são geralmente ajustados, para que não ocorra submersão permanente.

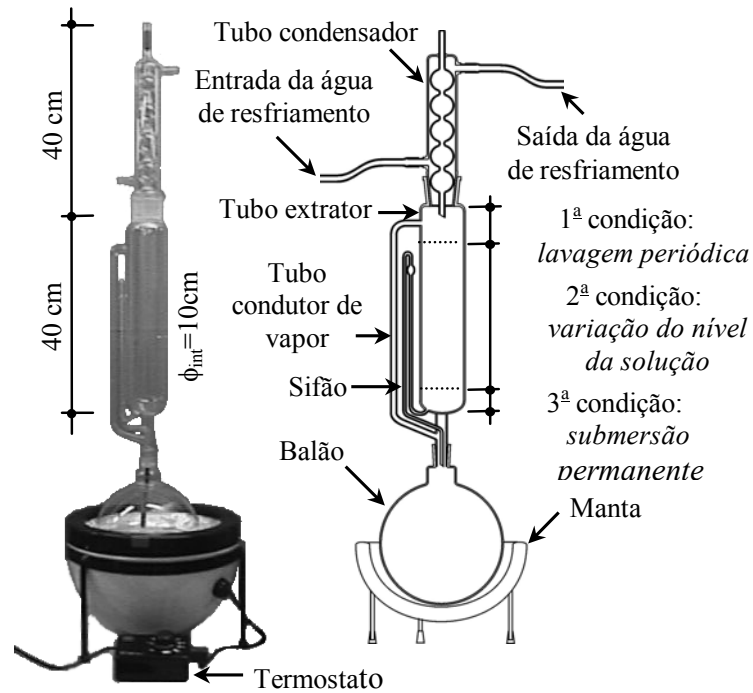


Figura 3.4 - Detalhamento do equipamento Soxhlet de lixiviação contínua (Maia, 2001).

3.2.3.3 – Ciclos de Saturação e Secagem

Este procedimento é utilizado normalmente para materiais rochosos. Tenta reproduzir, no laboratório, a alteração do material provocada pelas variações da umidade e da temperatura do material no campo. As condições de alteração no laboratório não são as mesmas que as condições de alteração no campo. No entanto, os resultados indicados na literatura mostram que o procedimento pode ser representativo das condições de alteração no campo (Minette, 1982). O procedimento de ciclagem mais comum é o de saturação em água natural ou destilada seguido de secagem ao ar ou em estufa. O tempo necessário para a saturação e para a secagem depende do tipo do material, podendo ser previamente definido por meio das curvas de variação da umidade com o tempo, obtidas a partir de ensaios de saturação e de secagem (Frazão, 1993). As curvas possibilitam a definição dos tempos mínimos de saturação e de secagem que melhor representam os estados saturado e seco de materiais rochosos.

Capítulo 4 - CASO E METODOLOGIA DE ESTUDO

4.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as características dos materiais estudados e o programa experimental desenvolvido para este estudo. São apresentadas também as características climáticas da região onde estes materiais foram submetidos às condições de degradação natural no campo.

4.2 – MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado nessa pesquisa foi o geotêxtil tecido HATE, produzido a partir de laminetes de polipropileno. O material foi cedido pela empresa especializada na produção de geossintéticos, Huesker Ltda. Foram utilizadas duas amostras deste geotêxtil com quantidades diferentes de aditivos antioxidantes. A Amostra A, produzida especialmente para a pesquisa, possui cerca do dobro da quantidade de aditivos antioxidantes que a Amostra B, que é a amostra comercializada.

A seguir são apresentadas as especificações referentes à Amostra B, segundo especificações técnicas do fabricante (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do material, segundo o fabricante.

Resistência à tração (ABNT 12824)	Longitudinal	$\geq 45 \text{ kN/m}$
	Transversal	$\geq 45 \text{ kN/m}$
Deformação na resistência nominal (ABNT 12824)	Longitudinal	$\leq 15\%$
	Transversal	$\leq 15\%$
Permeabilidade normal (carga de água de 0,1 m)		$\geq 10 \text{ l/m}^2/\text{s}$
Abertura aparente dos poros		0,8 mm
Dimensões	Largura	5,0 m
	Comprimento	200,0 m

4.3 – METODOLOGIA DE ESTUDO

A metodologia para o desenvolvimento do estudo da degradação dos geotêxteis tecidos é ilustrada através do organograma indicado na Figura 4.1. Nesta metodologia destacam-se quatro fases, que devem ser executadas na seguinte ordem:

- Obtenção do material de estudo (amostragem);
- Produção de amostras com degradação induzida de forma acelerada no laboratório e com alteração natural no campo;
- Obtenção dos parâmetros que caracterizam o comportamento do material intacto e degradado no laboratório e no campo;
- Análise dos resultados e previsão do comportamento do material a longo prazo.

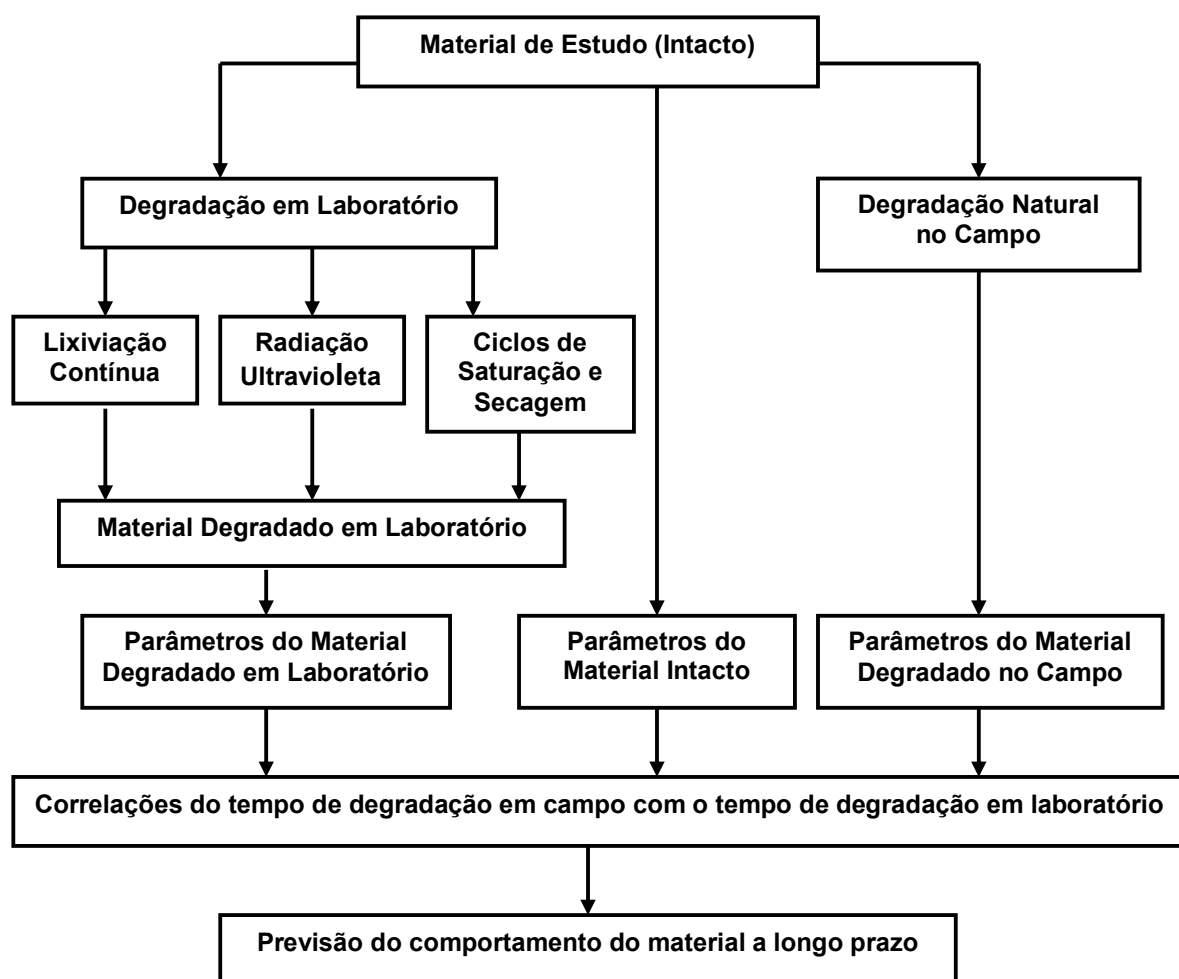


Figura 4.1 - Metodologia para avaliação da degradação em geossintéticos.

Uma parte do material de estudo (intacto) é destinada para a produção de amostras alteradas de forma natural no campo e sob condição acelerada no laboratório. O restante do material intacto, o material alterado naturalmente e o alterado no laboratório são destinados à determinação dos parâmetros dos materiais.

A presente pesquisa busca determinar as características mais relevantes dos materiais, destacando-se as relativas à resistência e deformabilidade. Para isto, são executados os seguintes procedimentos de laboratório: caracterização microscópica, ensaios de resistência à tração e ao puncionamento. São utilizados equipamentos disponíveis no LECIV-UENF e de outros laboratórios da UENF para a execução destes ensaios.

4.4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental busca a produção de amostras degradadas no campo e no laboratório. A Tabela 4.2 apresenta os níveis de degradação e o número de amostras para cada processo de degradação considerado nesta pesquisa. Em seguida, faz-se ensaios de caracterização física e mecânica nas amostras degradadas e intactas visando a obtenção dos parâmetros do material. A Tabela 4.3 mostra o programa de ensaios mecânicos executado na presente pesquisa. Ressalta-se que o programa desenvolvido é idêntico para ambas amostras.

Tabela 4.2 - Programa para a degradação de corpos de prova com 20x50 cm de dimensões.

Processo de Degradação	Nível de degradação (número de amostras de 20x50 cm)				
	1º	2º	3º	4º	5º
<i>Natural (dias)</i>	90 (5)	180 (5)	420 (5)	-	-
<i>Ciclos de Umidade (horas)</i>	100 (4)	200 (4)	360 (4)	720 (4)	-
<i>Lixiviação contínua (horas)</i>	200 (4)	400 (4)	800 (4)	1600 (4)	3200 (4)
<i>C-UV B (horas)</i>	240 (4)	480 (4)	1000 (4)	2000 (4)	-

Tabela 4.3 - Programa de ensaios mecânicos executado para corpos de prova com 5x15 cm de dimensões.

Ensaio	Tipo de Degradação	Nível de Degradação (número de corpos de prova de 5x15 cm)					
		0	1°	2°	3°	4°	5°
Resistência à Tração Não-Confinada	Intacto	(5)					
	Natural (dias)		90 (5)	180 (5)	420 (5)	-	-
	Ciclos de Umidade (horas)		100 (5)	180 (5)	360 (5)	720 (5)	-
	Lixiviação Contínua (horas)		200 (5)	400 (5)	800 (5)	1600 (5)	3200 (5)
	C-UV B (horas)		240 (5)	480 (5)	1000 (5)	2000 (5)	-
	Intacto	(5)					
Resistência ao Puncionamento	Natural (dias)		90 (5)	180 (5)	420 (5)	-	-
	Ciclos de Umidade (horas)		100 (5)	180 (5)	360 (5)	720 (5)	-
	Lixiviação Contínua (horas)		200 (5)	400 (5)	800 (5)	1600 (5)	3200 (5)
	C-UV B (horas)		240 (5)	480 (5)	1000 (5)	2000 (5)	-
	Intacto	(5)					
	Natural (dias)		90 (5)	180 (5)	420 (5)	-	-

4.5 – PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Inicialmente, foram cortados corpos de prova com 20 cm de largura e 50 cm de comprimento e retirados transversalmente à direção principal da linha de produção do material na indústria (Figura 4.2), totalizando 70 corpos de prova para a Amostra A e 70 para a Amostra B. Para cada amostra foram mantidos intactos sete corpos de prova e os demais foram submetidos a procedimentos de degradação natural no campo e acelerada no laboratório (Tabela 4.2). Posteriormente aos processos de degradação os corpos de prova de 20x50 cm foram recortados corpos de prova retangulares com dimensões iguais a 5 cm de largura e 15 cm de comprimento para ensaios de tração não confinada e corpos de prova com 6 cm de diâmetro para ensaios de puncionamento estático. Estas dimensões se justificam pelo reduzido tempo de pesquisa para exposição do material aos processos de degradação e as reduzidas dimensões dos equipamentos de degradação disponíveis.



(a) processo de corte



(b) amostra com 20 x 50cm, pronta para ensaio

Figura 4.2 - Procedimento de amostragem.

4.6 – PROCEDIMENTOS DE DEGRADAÇÃO

A seguir são apresentados os procedimentos para a degradação natural no campo e para a degradação acelerada no laboratório (ciclos de saturação e secagem, lixiviação contínua e condensação e exposição à radiação ultravioleta).

4.6.1 – Procedimento para Degradação Natural

A degradação natural das amostras foi realizada no Campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, localizada na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ, com latitude de 21° 45' Sul, longitude de 41° 18' Oeste e altitude igual a 11 m.

Esse tipo de degradação é empregada em estudos a longo prazo, que visam a obtenção de informações sobre os efeitos da degradação em um determinado material. Apresenta a vantagem de expor diretamente a amostra às condições encontradas no campo, embora seja necessária a realização de ensaios em diferentes localidades para abranger todas as possíveis variações climáticas.

Um dos fatores mais importantes sobre o grau de degradação de materiais poliméricos em campos de teste é o ângulo de exposição das amostras. Neste sentido, foram fixados cabos de aço com inclinação igual a 21°45' em relação à horizontal, que corresponde à latitude local, localizado no telhado do edifício do CCT na UENF (Figura 4.3). Nota-se a presença de espaçadores de madeira entre os

cabos de aço, garantindo que os corpos de prova se mantenham esticados durante o tempo de exposição. Todo este procedimento permite maior circulação de ar e evita a ocorrência concentração de temperaturas em pontos localizados dos corpos de prova, assegurando uma maior incidência e conseqüentemente maior absorção da radiação solar.



Figura 4.3 - Amostras expostas com inclinação segundo a latitude local.

Considerando que os fatores climáticos são definidores do processo de degradação de materiais, apresentam-se a seguir as características climáticas da região de exposição dos geotêxteis à degradação natural.

4.6.1.1 – Classificação Climática

De acordo com a classificação de Köppen, a área de estudo possui um clima quente e úmido, com estação chuvosa no verão. Do ponto de vista do regime térmico dos solos, a totalidade da área se enquadra no conceito de regime “hyperthermic”, ou seja, com temperatura média maior que 22°C e diferença entre as médias de verão e inverno maior que 5°C até a profundidade de 50 cm de solo (IAA/SONDOTÉCNICA, 1984).

4.6.1.2 – Temperatura do Ar

O clima é tropical, com temperatura superior a 22°C em toda a Região. Quanto às mínimas, observa-se um padrão muito mais homogêneo, com média de cerca de 18,5°C. Sistemáticamente, a distribuição anual revela o trimestre janeiro-fevereiro-março como a época mais quente do ano, podendo-se considerar também o mês de dezembro. Os meses de junho e julho são destacadamente os mais frios, apresentando valores médios entre 15°C e 16°C. A Figura 4.4 mostra os valores médios da temperatura média mensal do ar, em °C, medida no período de 1975 a 1999 (Azevedo *et al.*, 2000) e referente ao período da pesquisa, março de 2003 a abril de 2005, obtida através de boletim da PESAGRO/RIO (2005).

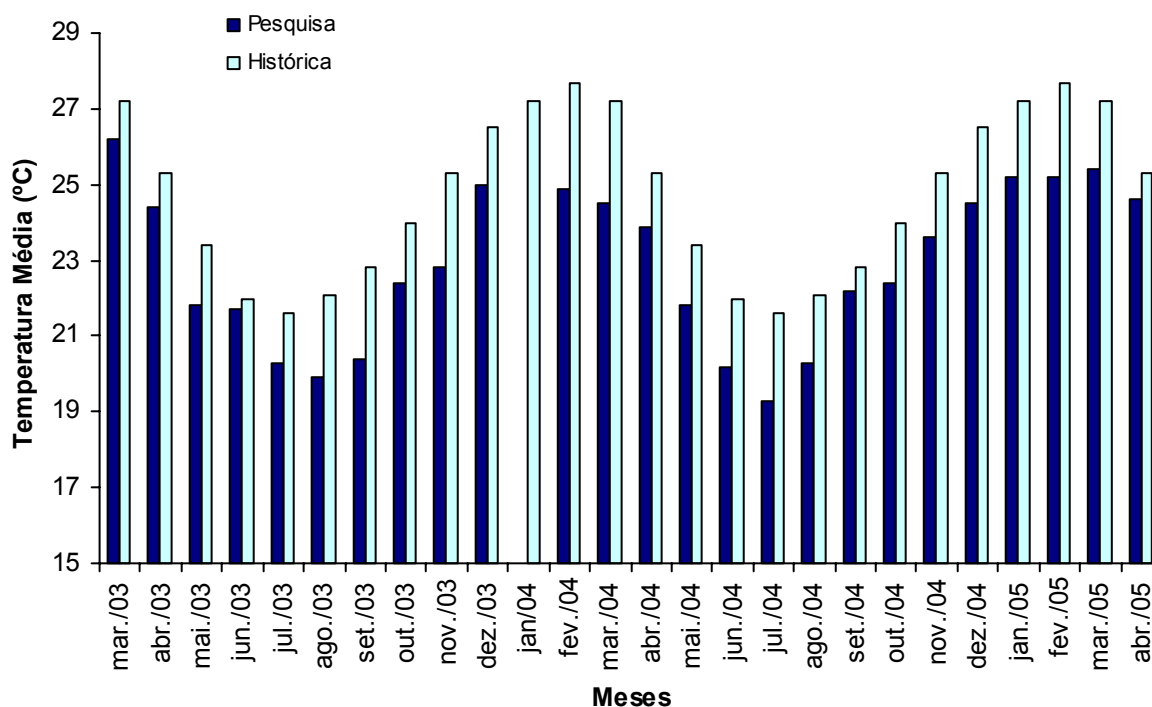


Figura 4.4 - Temperatura média mensal do ar, em °C, do período de 1975 a 1999 e referente ao período da pesquisa.

4.6.1.3 – Umidade Relativa do Ar

A Figura 4.5 apresenta os valores médios da umidade relativa média mensal do ar no período de 1975 a 1999 (Azevedo *et al.*, 2000) e ocorrida durante o período da pesquisa, fornecidos pela PESAGRO/RIO (2005).

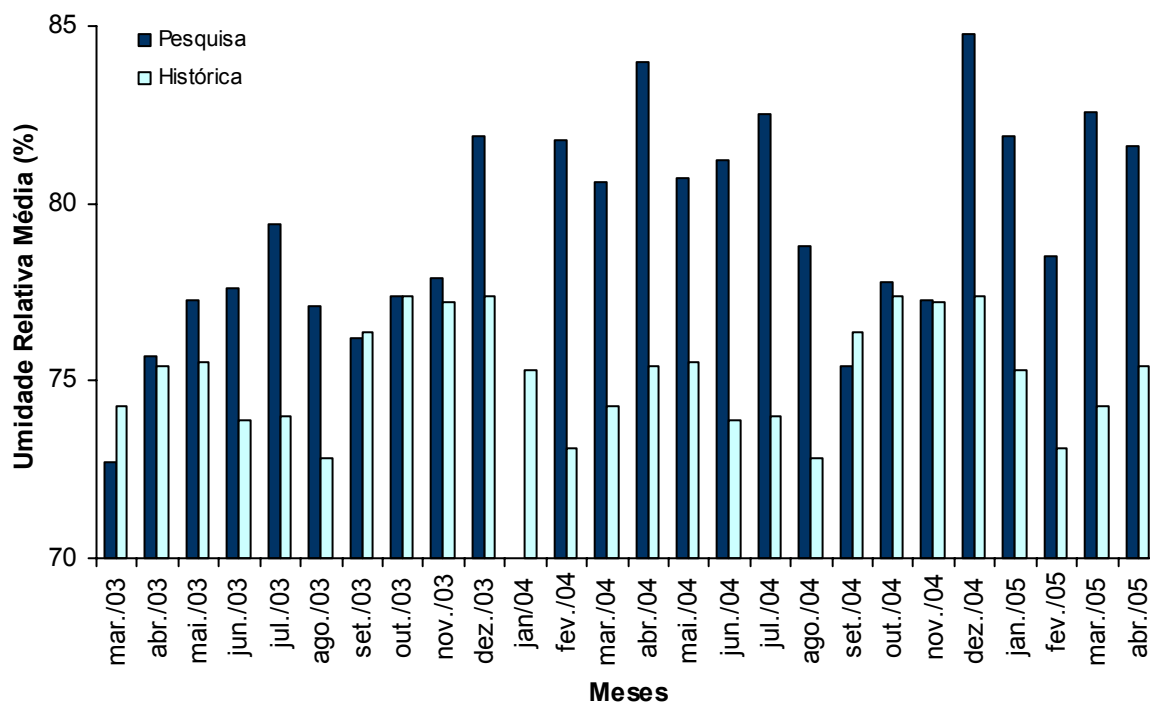


Figura 4.5 - Umidade relativa média mensal do ar, em %, média do período de 1975 a 1999 e referente ao período da pesquisa.

4.6.1.4 – Vento

Devido à sua posição geográfica, a Região Norte Fluminense está sujeita aos ventos predominantes de Nordeste, oriundos do centro anticiclônico semipermanente do Atlântico Sul, e menos freqüentes são os ventos de Norte e os de quadrante Sul.

Na Figura 4.6 são apresentados os valores das velocidades médias mensais do vento no período de 1975 a 1999 (Azevedo *et al.*, 2000) e da variação da velocidade do vento mensal ocorrida durante o período da pesquisa. Verifica-se que a velocidade do vento apresenta seus maiores valores na primavera e no verão, implicando em um comportamento dos valores da velocidade do vento influenciado, principalmente, pela temperatura mínima do ar. Ressalta-se que a velocidade do vento, medida na altura em que foram expostas as amostras, referente ao período da pesquisa, março de 2003 a abril de 2005, foi calculada pela equação:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{1/7}$$

Equação 4.1

onde V_1 é a velocidade fornecida pela PESAGRO/RIO (2005) a altura de 2 m igual a Z_1 e Z_2 igual a 10 m é a altura em que as amostras foram expostas.

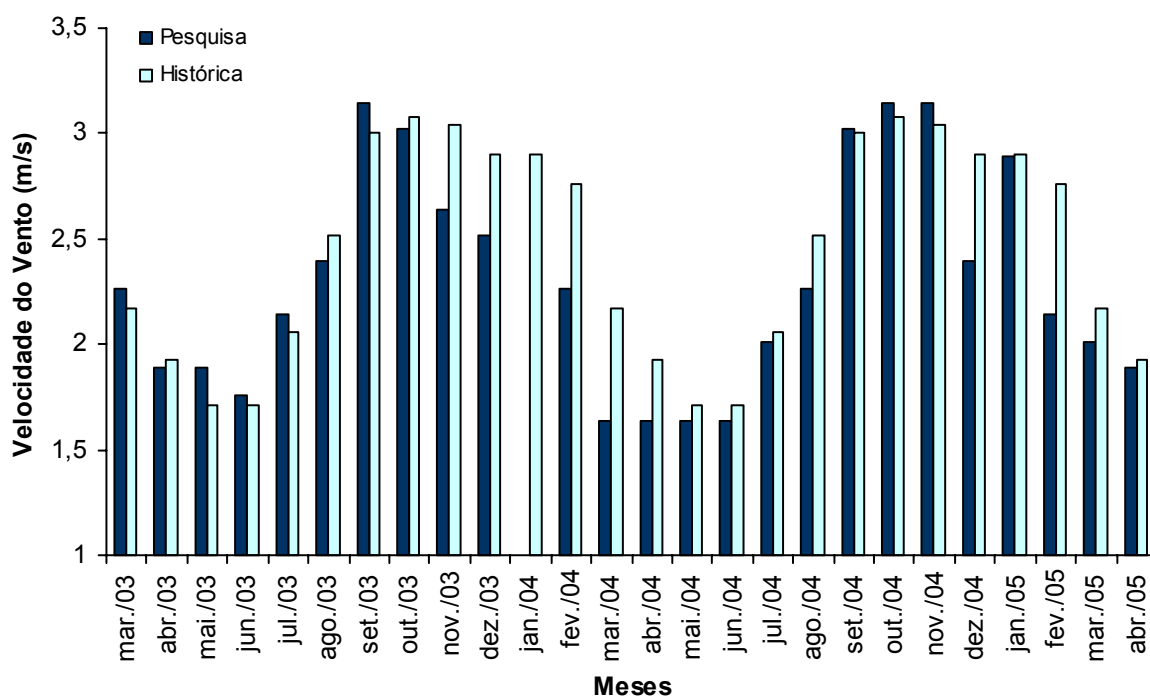


Figura 4.6 - Valores da velocidade do vento média mensal, em m/s, em Campos dos Goytacazes, no período de 1975 a 1999 e no período da pesquisa, à altura de 10,0 m.

4.6.1.5 – Precipitação Atmosférica

A distribuição anual da precipitação é praticamente a mesma em toda a Região, sendo determinada, em grande parte, pela predominância das perturbações geradas durante o verão, devido a instável massa equatorial continental. A época chuvosa é presidida pelo “verão amplo”, que se estende de outubro a abril, sendo quase sistematicamente o mês de dezembro o de maior pluviosidade. O inverno define a estação mais seca que detém, em geral, cerca de 10% do total anual, sendo as maiores estiagens verificadas no mês de agosto.

Conforme se pode verificar, na Figura 4.7 são apresentados os valores médios da precipitação mensal para a região de Campos dos Goytacazes, no período de 1975 a 1999 (Azevedo *et al.*, 2000) e da precipitação atmosférica ocorrida durante o período da pesquisa (PESAGRO/RIO, 2005), que demonstram a ocorrência do período chuvoso e do período seco, e ainda, a diferença de magnitude entre os meses.

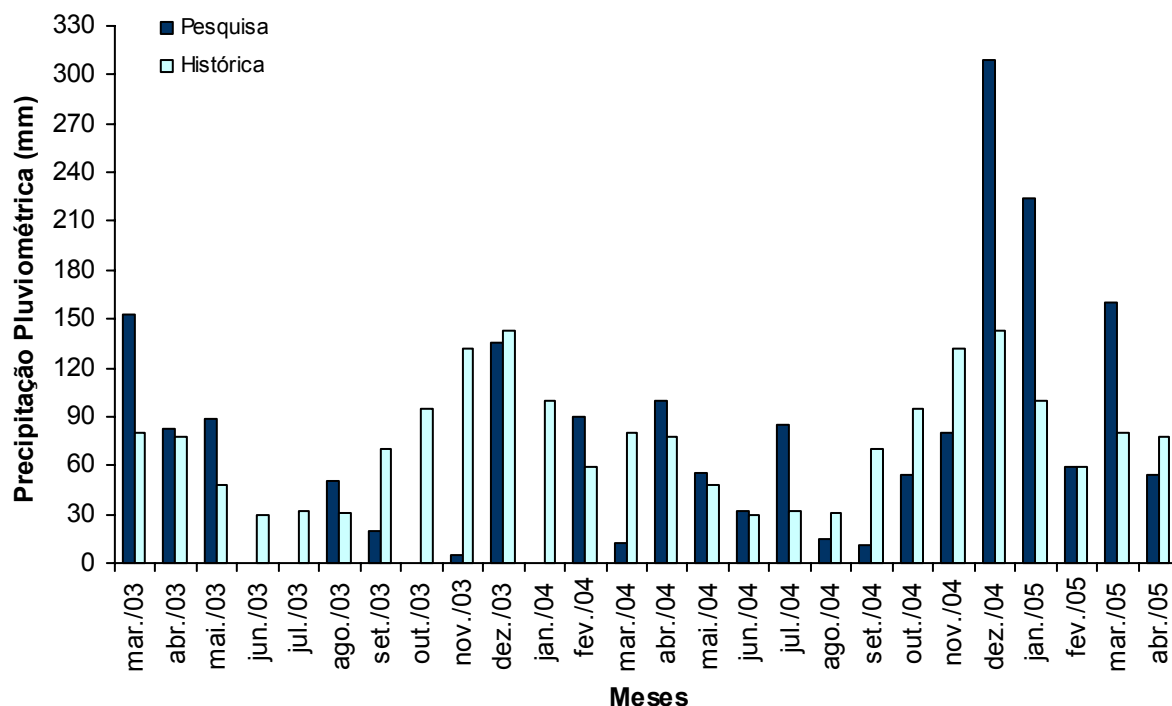


Figura 4.7 - Valores da precipitação pluviométrica média mensal, em mm, em Campos dos Goytacazes, no período de 1975 a 1999 e no período da pesquisa.

4.6.1.6 – Radiação Solar

Os valores da radiação correspondentes à região do ultravioleta podem ser expressos através dos dados de irradiância, em W.m^{-2} . A Figura 4.8 mostra a variação da radiação solar mensal ocorrida durante o período da pesquisa fornecida pela PESAGRO/RIO (2005).

4.6.2 – Procedimento para Degradação Acelerada em Laboratório

Uma fase importante do estudo é a degradação dos materiais geossintéticos em condições aceleradas no laboratório. Esta degradação tem por objetivo simular de forma acelerada a degradação que o material sofre no campo. Para isto são utilizados os seguintes procedimentos de laboratório: degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta, por lixiviação contínua e por ciclos de umidade.

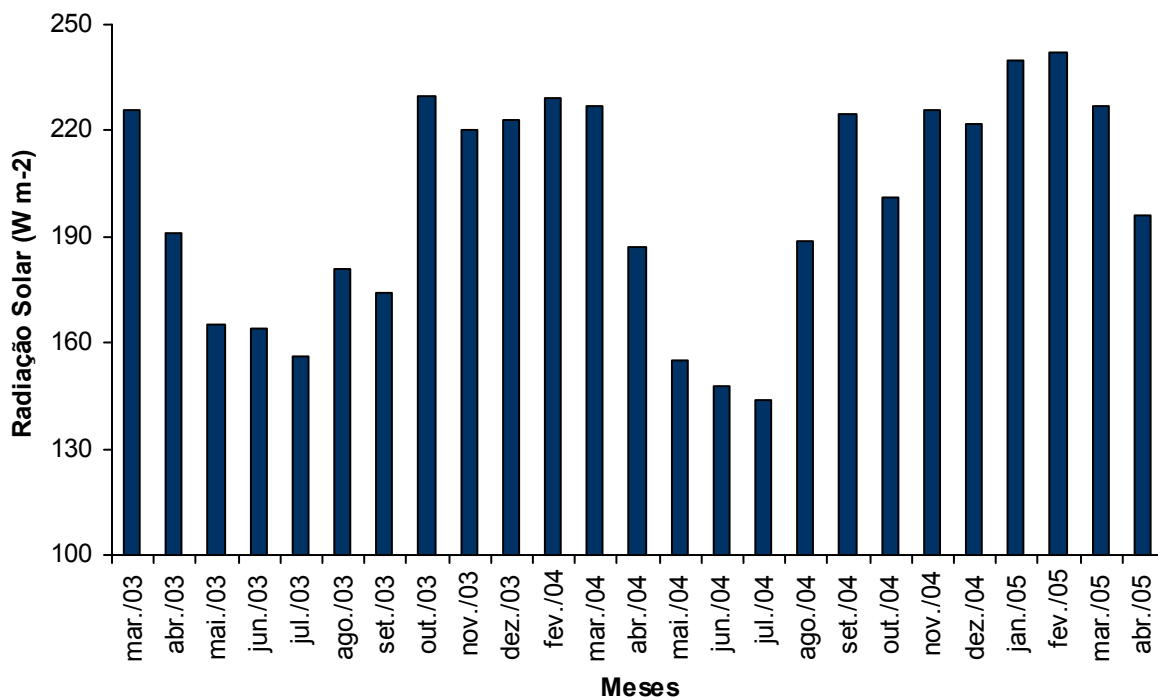


Figura 4.8 - Radiação solar mensal, em W.m^{-2} , na cidade de Campos dos Goytacazes, no período da pesquisa.

4.6.2.1 – Condensação e Exposição à Radiação Ultravioleta

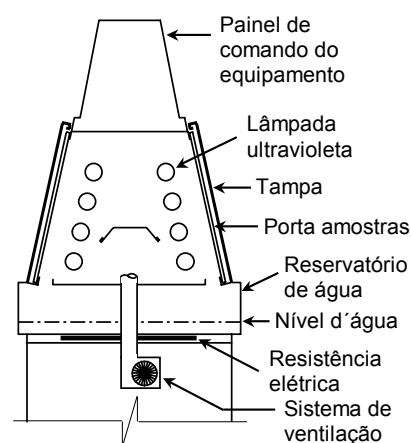
Para este tipo de degradação foi utilizado o equipamento C-UV B disponível no Laboratório de Engenharia Civil LECIV-UENF (Figura 4.9). Neste equipamento, os corpos de prova são submetidos a ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta. O ciclo adotado para degradar os geotêxteis contém 4 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 comportam um total de 51 amostras com largura igual a 75 mm e comprimento igual a 150 mm. Como na pesquisa os corpos de prova possuem dimensões de 20 cm de largura por 50 cm de comprimento, o número de corpos de prova submetidos à degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta no equipamento C-UV B foi reduzido a 10 por etapa. Para tanto, foram utilizados dois suportes para cada corpo de prova exposto à degradação.

As fontes de luz do equipamento C-UV B são semelhantes fisicamente a uma lâmpada fluorescente comum de 40W de potência. Para obtenção da radiação ultravioleta, as fontes de luz do equipamento estão revestidas por um tipo de fósforo que emite a radiação especificada. A emissão situa-se na faixa entre 280 e 320 nm, ou seja, na região do UV B com um mínimo de luz visível e sem a presença de radiação infravermelha.

É importante evitar a variação da intensidade total de radiação, desta maneira as lâmpadas são substituídas quando atingem 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 banco a cada 400 horas, mantendo-se uma média de radiação constante e sem alteração substancial durante o tempo em que se processa a degradação.



(a) vista frontal



(b) corte transversal esquemático

Figura 4.9 - Equipamento C-UV B do LECIV-UENF.

4.6.2.2 – Lixiviação Contínua

Foi utilizado o equipamento Soxhlet da PUC-Rio (Figura 4.10) que permite submeter corpos de prova de pequenos volumes a períodos controlados de variação de temperatura, de precipitação e de flutuação do nível da solução de lixiviação. O procedimento do ensaio é o mesmo exposto por Maia (2001), que utilizou tal procedimento na degradação de materiais rochosos. Os níveis de degradação e o número de corpos de prova estão expostos no programa experimental (Tabela 4.2).



Figura 4.10 - Equipamento Soxhlet convencional para ensaios de lixiviação contínua, cedido pela PUC-Rio.

4.6.2.3 – Ciclos de Saturação e Secagem

Os ensaios de saturação e secagem tentam reproduzir, no laboratório, a alteração do material provocada pelas variações da umidade (nível d'água) e da temperatura do material no campo. Para o caso específico dos geotêxteis, os ciclos de saturação e secagem foram executados por meio da submersão das amostras em água destilada à temperatura ambiente 21° C, com posterior secagem em estufa a 100° C. Ressalta-se que este procedimento de ensaio geralmente é utilizado para materiais rochosos.

As amostras foram submetidas a ciclos com 2 horas de submersão em água destilada seguido de 2 horas de secagem em estufa. Constata-se que períodos de 2 horas de submersão ou de secagem garantem, respectivamente, a saturação ou secagem para os geotêxteis. Ressalta-se que as amostras permaneceram submersas em água destilada, à temperatura ambiente, durante o tempo em que

não foram submetidas ao procedimento de degradação, como por exemplo, durante a noite. A Figura 4.11 mostra as amostras durante o procedimento de ciclagem.



(a) amostras imersas em água destilada



(b) suporte com amostras

Figura 4.11 - Amostras em imersão durante o procedimento de saturação e secagem.

4.7 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As técnicas de microscopia eletrônica têm um papel importante na investigação da morfologia e caracterização de materiais poliméricos, uma vez que muitas microestruturas de polímeros não podem ser analisadas por microscopia ótica, devido à sua resolução limitada. A microscopia eletrônica apresenta algumas vantagens em relação à microscopia ótica, como maior resolução, maior profundidade de campo, permitindo a observação da amostra em três dimensões. A apresentação das amostras em microscopia eletrônica de varredura é bastante simples, quando comparada com a microscopia eletrônica de transmissão, porque a análise é superficial, o que torna a espessura da amostra um fator secundário.

Na microscopia eletrônica, a superfície da amostra a ser examinada é rastreada com um feixe de elétrons, cuja parcela refletida, ou retroespalhada, é coletada e então mostrada à mesma taxa de varredura sobre um tubo de raios catódicos, semelhante à tela de uma TV. A imagem na tela, que pode ser fotografada, representa as características da superfície da amostra.

Na pesquisa, foram analisados corpos de prova quadrados intactos e degradados, no campo e no laboratório, de 100 mm² aproximadamente. Um fino revestimento metálico em ouro foi aplicado sobre a superfície dos corpos de prova para garantir a

condição necessária de condução de eletricidade. A análise dos materiais foi efetuada utilizando-se o equipamento de microscopia eletrônica de varredura do Laboratório de Biologia Celular e Tecidual LBCT – UENF.

4.8 – ENSAIOS MECÂNICOS

A estrutura molecular dos materiais poliméricos proporciona características próprias a estes materiais. Dentre estas características incluem-se as propriedades mecânicas.

As propriedades mecânicas dos geossintéticos são caracterizadas pela resposta destes a tensões ou deformações aplicadas. A natureza desta resposta depende principalmente da temperatura e do tempo, assim como da estrutura e das condições de preparação do material.

A avaliação das propriedades mecânicas pode ser de forma estática ou dinâmica, envolvendo ensaios destrutivos do material. Um geossintético pode ser solicitado de forma estática através de tração, compressão, flexão, cisalhamento entre outros. Em ensaios tensão vs. deformação, os principais parâmetros que quantificam a resistência mecânica dos materiais poliméricos são a rigidez, tensão e deformação no escoamento, tensão e deformação na ruptura e a tenacidade.

A rigidez em tração é obtida através da inclinação da curva carga vs. deformação e pode ser correlacionada com a energia necessária para deformar as ligações entre os átomos de carbono na cadeia principal. Quanto mais rígida a cadeia polimérica, maior será a rigidez J.

4.8.1 – Ensaios de Resistência à Tração Não-Confinada

Para a realização dos ensaios de resistência à tração não confinada, utilizou-se uma máquina universal de ensaios mecânicos, Instron modelo 5582, com capacidade máxima de 100 kN.

Para a execução dos ensaios desta pesquisa foram desenvolvidas garras especiais (figuras 4.12 e 4.13) que podem ser acopladas ao sistema da máquina Instron. Este conjunto de garras é capaz de ensaiar corpos de prova com 5 e 10 cm de largura. Os ensaios de resistência a tração não confinada foram realizados em corpos de prova com dimensões de 5 cm de largura e 15 cm de comprimento, respeitando uma distância entre garras de 5 cm. Estas dimensões diferem das dimensões propostas

pela NBR 12824: Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga (ABNT, 1993) devido aos tamanhos reduzidos dos equipamentos de degradação utilizados nesta pesquisa. Um gabarito de madeira foi utilizado na montagem do conjunto de garras com o corpo de prova com o intuito de ajustar o corpo de prova ao sistema de fixação, assegurando sua centralização e orientação, de tal forma que o seu comprimento esteja posicionado paralelamente à direção de aplicação das cargas. Ressalta-se que a parte interna do conjunto de garras, onde os corpos de prova são fixados, possui uma proteção aderente para assegurar que os corpos de prova não se desloquem durante a aplicação de carga. Como proteção aderente foi utilizada lixa de aço nº 100. A velocidade de deformação imposta para os ensaios foi igual a 20% do espaçamento inicial entre garras por minuto, ou seja, 10 mm/min.

De posse das curvas carga vs. deformação pôde-se calcular as propriedades mecânicas: resistência à tração na ruptura, deformação na ruptura e as rigidezes a 2, 5 e 10% de deformação segundo recomendação da NBR 12824 (ABNT, 1993). Adicionalmente, foram calculadas a rigidez tangente a 50% da carga de ruptura, a rigidez secante a 50% da carga de ruptura e a rigidez secante final.

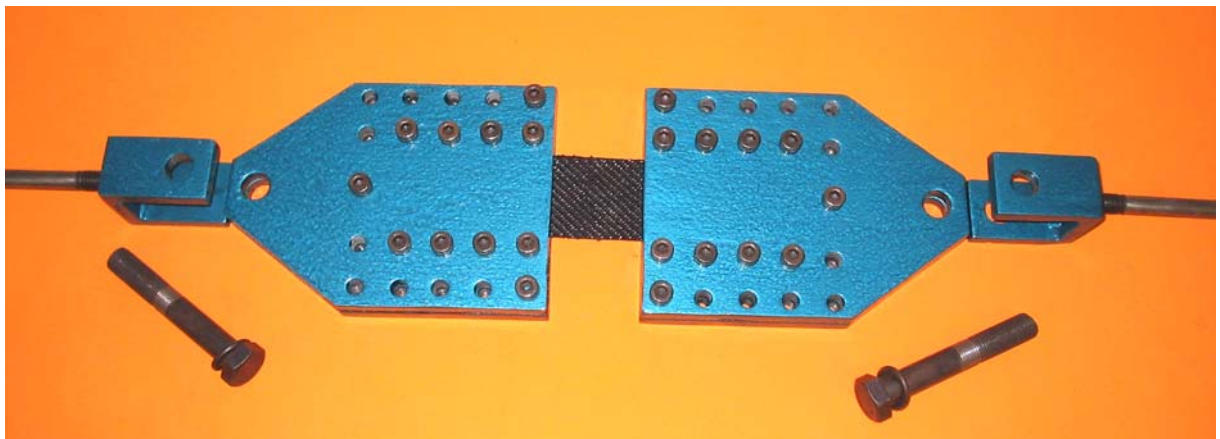


Figura 4.12 - Conjunto de garras.

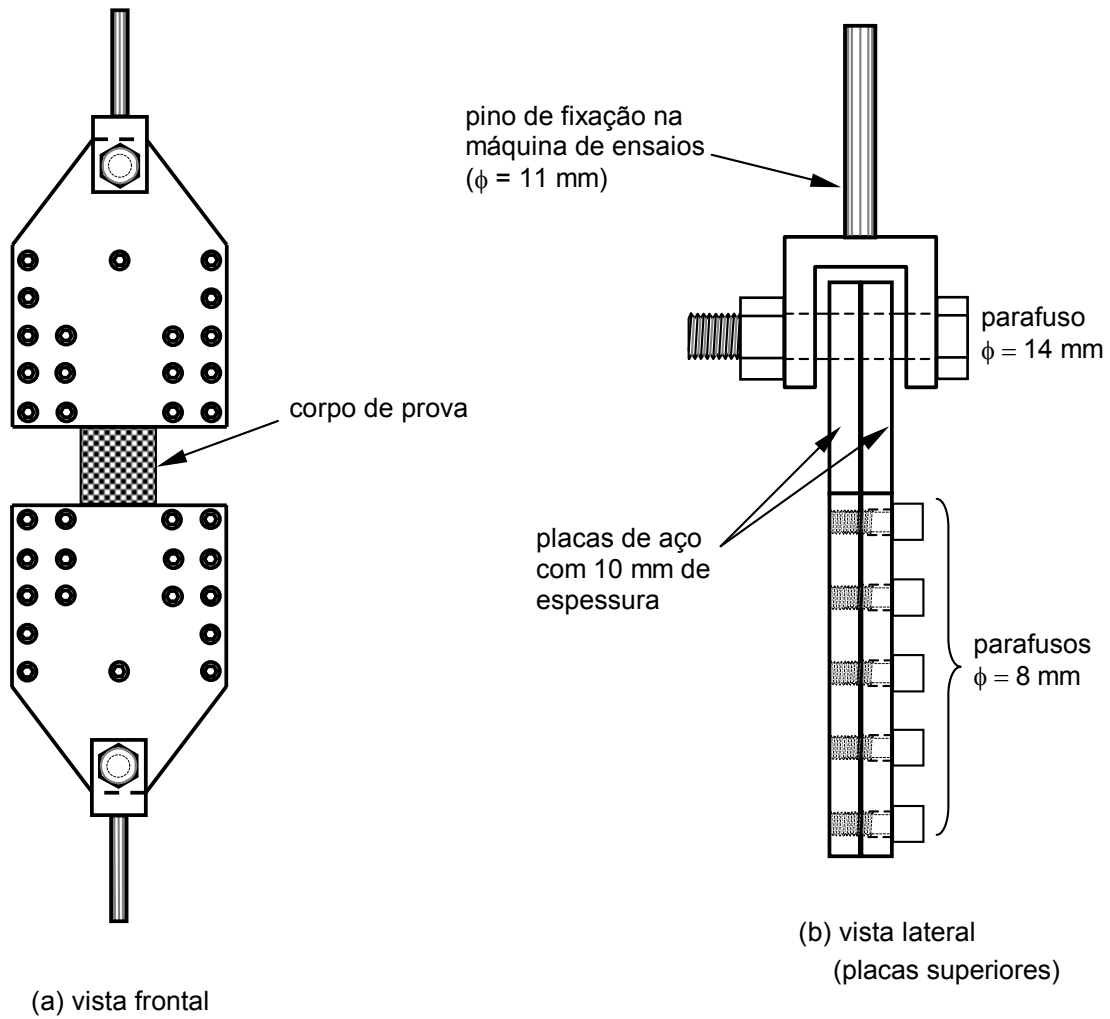


Figura 4.13 – Detalhamento das garras para ensaios de tração não confinada em geotêxteis.

4.8.2 – Ensaios de Resistência ao Puncionamento

Os ensaios de resistência ao puncionamento foram realizados na mesma máquina utilizada na execução dos ensaios de tração não-confinada.

Os corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência ao puncionamento não contêm as dimensões especificadas pela NBR 13359: Geotêxteis - Determinação da resistência ao puncionamento estático - Ensaio com pistão tipo CBR (ABNT, 1995) devido aos tamanhos reduzidos dos equipamentos utilizados. Os corpos de prova possuem diâmetro de 6 cm e para os ensaios foram admitidas as dimensões indicadas para o ensaio de Mini-CBR. Para isto, foram desenvolvidos um punção de 17 mm de diâmetro e um suporte cilíndrico de diâmetro interno igual a 50 mm e altura igual a 100 mm (figuras 4.14 e 4.15). Os corpos de prova foram fixados entre dois anéis metálicos revestidos com proteção aderente para assegurar melhor fixação dos mesmos. O sistema de fixação foi acoplado na máquina de ensaios de maneira tal que o punção ficasse centralizado perpendicularmente ao corpo de prova e em contato com este. Os ensaios procederam com velocidade de deslocamento constante e igual a 50 mm/min.

De posse das curvas força de penetração vs. penetração pôde-se calcular as propriedades mecânicas: resistência ao puncionamento e a penetração máxima.



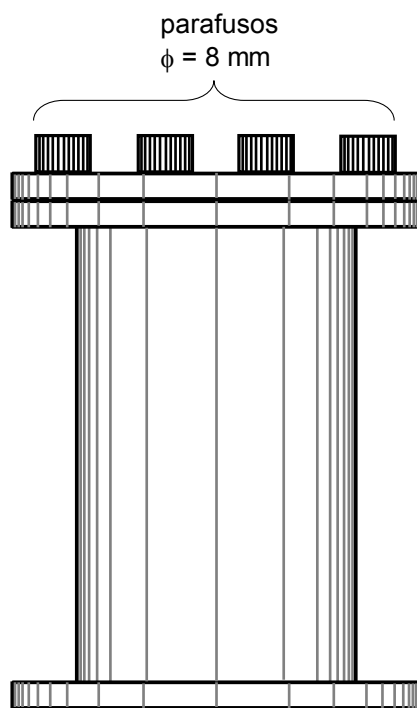
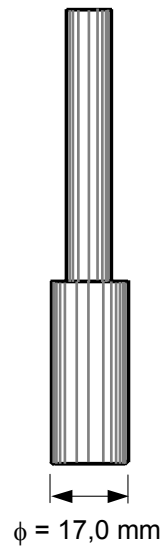
(a) suporte



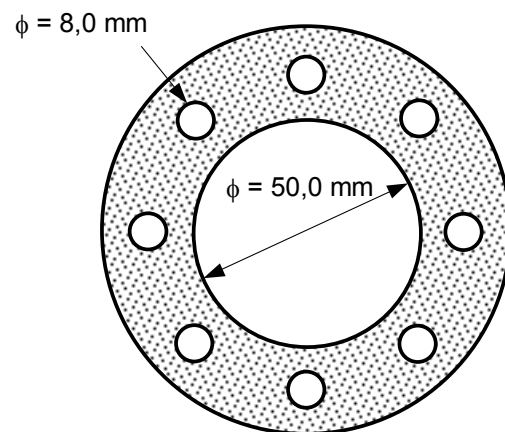
(b) punção

Figura 4.14 – Suporte e punção para ensaios de puncionamento em geotêxtil.

(a) punção em aço



(b) suporte em vista frontal



(c) face interna do anel metálico com proteção aderente

Figura 4.15 - Suporte e punção desenvolvidos para acoplamento na máquina de ensaios.

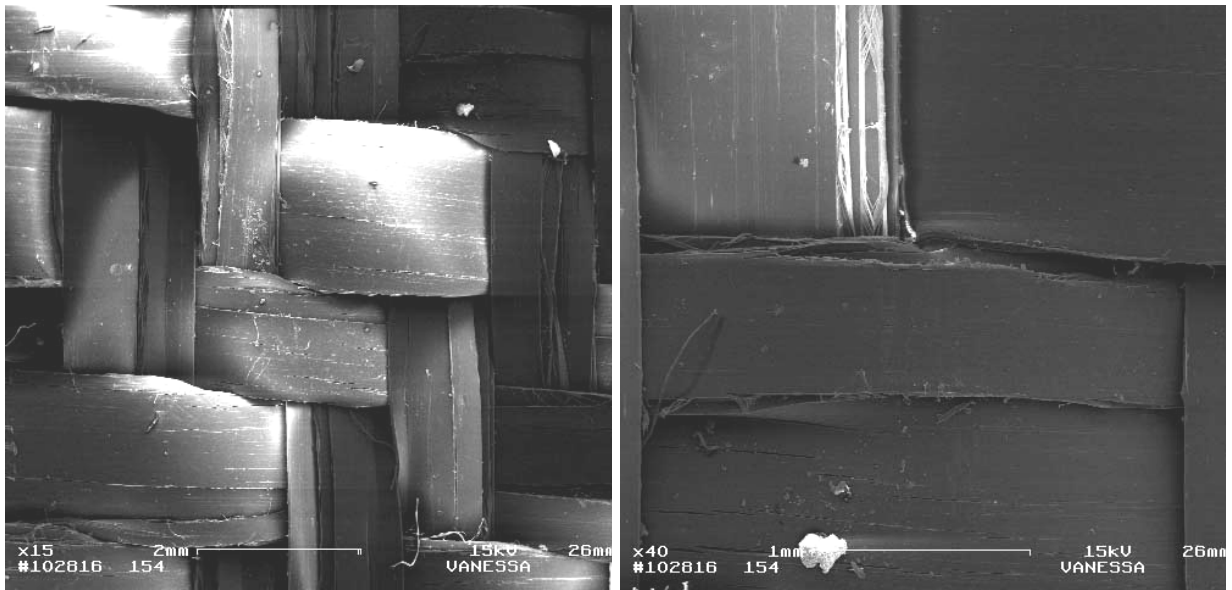
Capítulo 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises por microscopia eletrônica de varredura e dos ensaios de tração não-confinada e puncionamento estático, realizados com os dois tipos de geotêxteis tecidos utilizados na pesquisa: Amostra A, com maior teor de aditivos antioxidantes, e Amostra B, com um teor de aditivos antioxidantes cerca de 50% menor que na Amostra A.

5.2 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

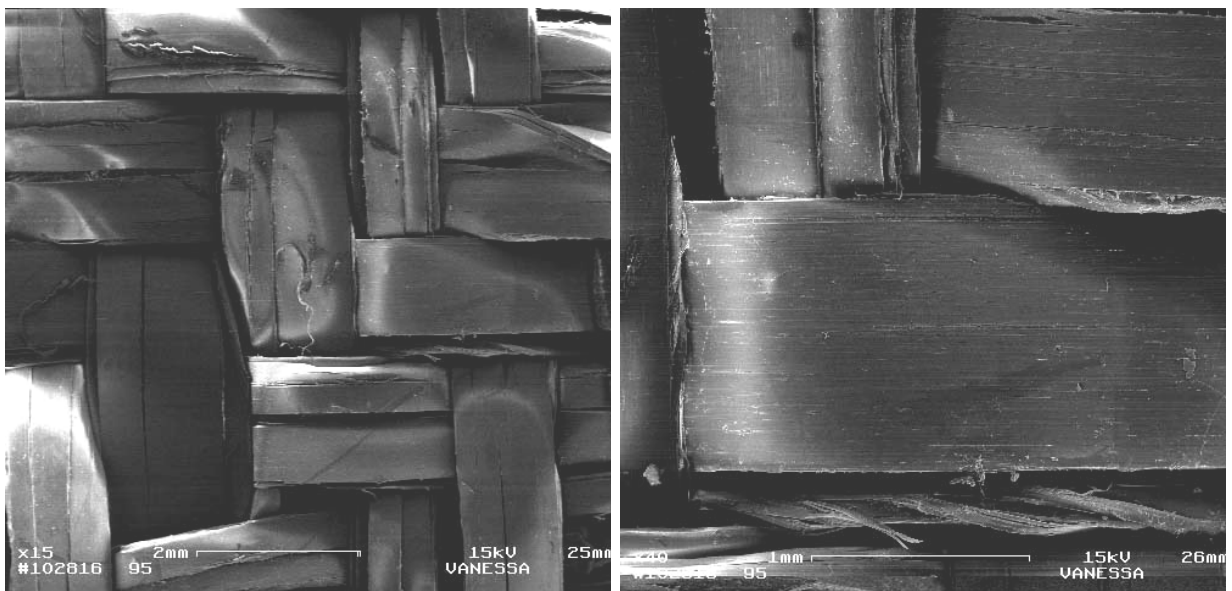
A análise por microscopia eletrônica de varredura mostrou que a estrutura física do geotêxtil estudado é afetada pelos processos de degradação natural, por ciclos de saturação e secagem, por lixiviação contínua ou por ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta (figuras 5.1 a 5.10). Nota-se destas figuras que, para os maiores níveis de degradação considerados nesta pesquisa (Tabelas 4.2 e 4.3), observa-se uma sensível dilatação das fibras do geotêxtil. Isto provoca a compressão das fibras na região do entrelaçamento promovendo uma pequena retração dos geotêxteis. Este efeito sugere, também, a ocorrência de modificações químicas na composição dos geotêxteis. Este efeito é mais evidenciado no processo de degradação por ciclos de saturação e secagem, observando-se o desprendimento de pequenas partículas com conseqüente pulverização do material (Figura 5.4).



(a) amostra intacta, aumentada 15 vezes.

(b) amostra intacta, aumentada 40 vezes.

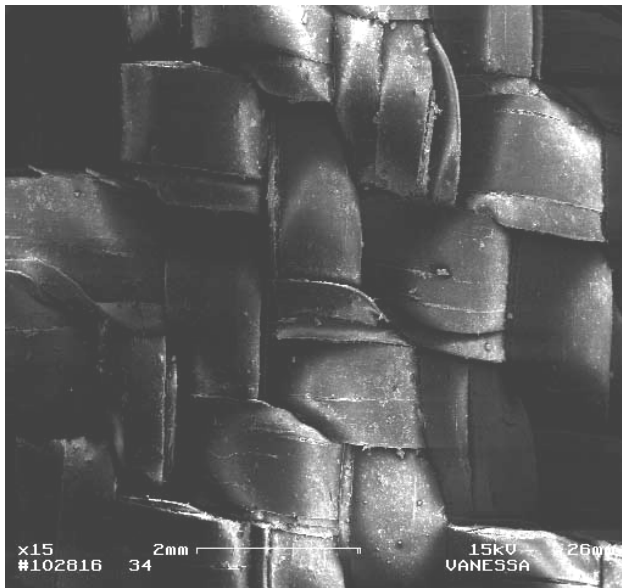
Figura 5.1 - Fotomicrografia da Amostra A não degradada (intacta).



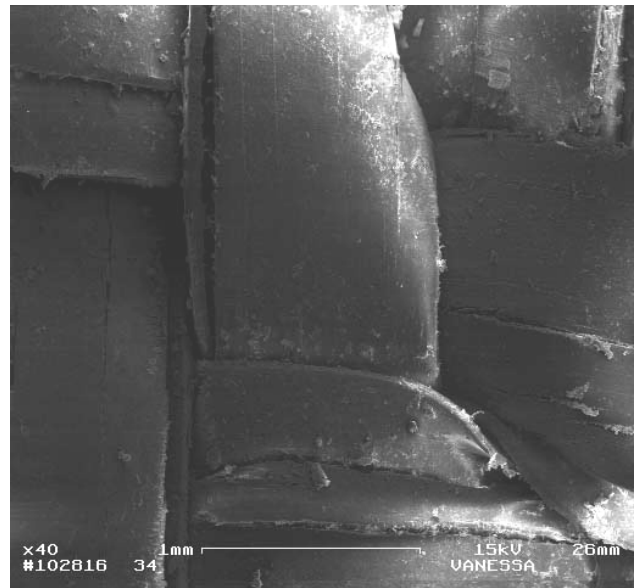
(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.2 - Fotomicrografia da Amostra A com 420 dias de degradação natural.

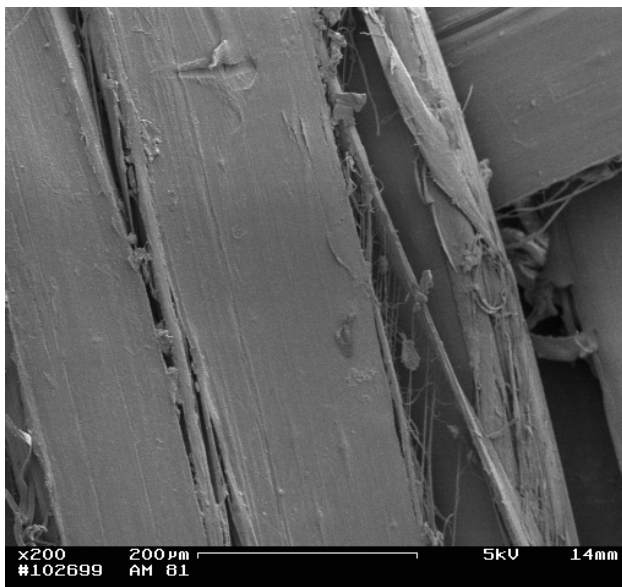


(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

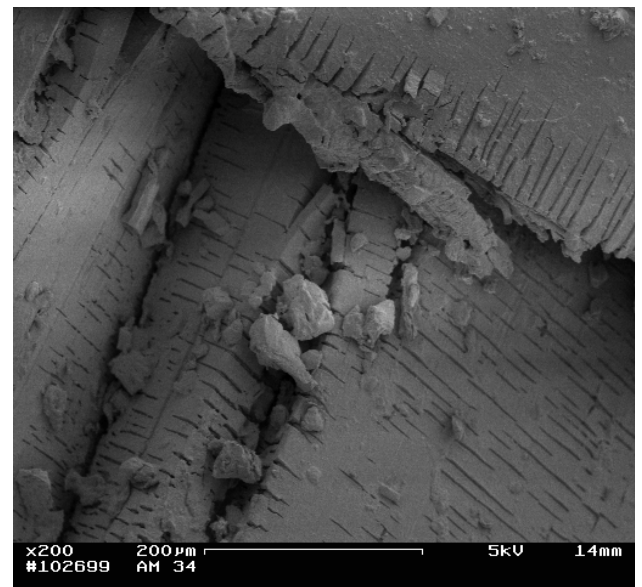


(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.3 - Fotomicrografia da Amostra A com 720 horas de degradação por ciclos de saturação e secagem.

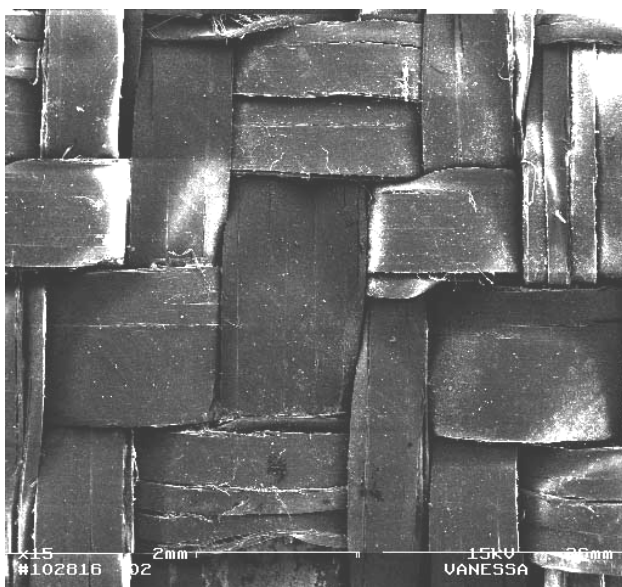


(a) amostra intacta, aumentada 200 vezes.

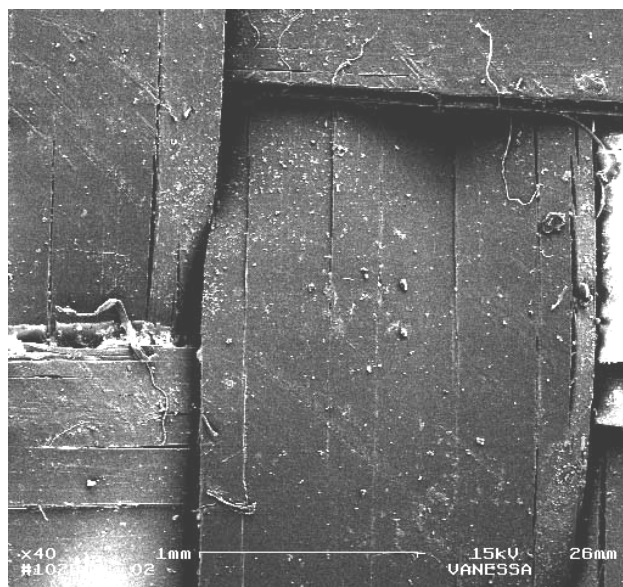


(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.4 - Fotomicrografia da Amostra A, aumentada em 200 vezes, intacta e com 720 horas de degradação por ciclos de saturação e secagem.

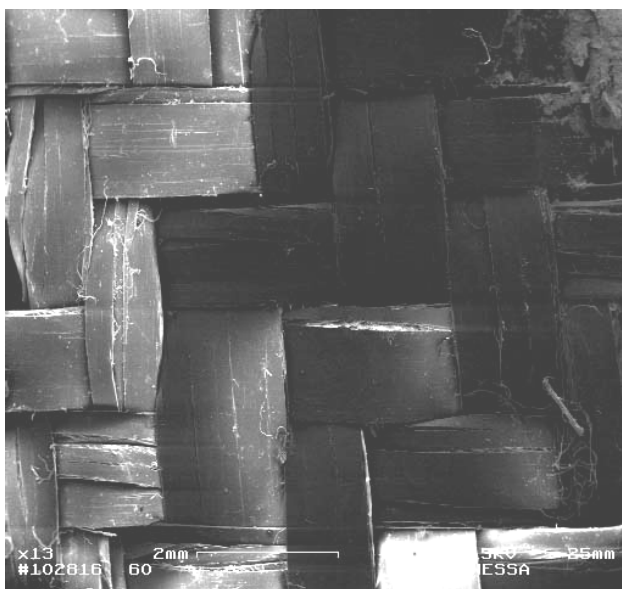


(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

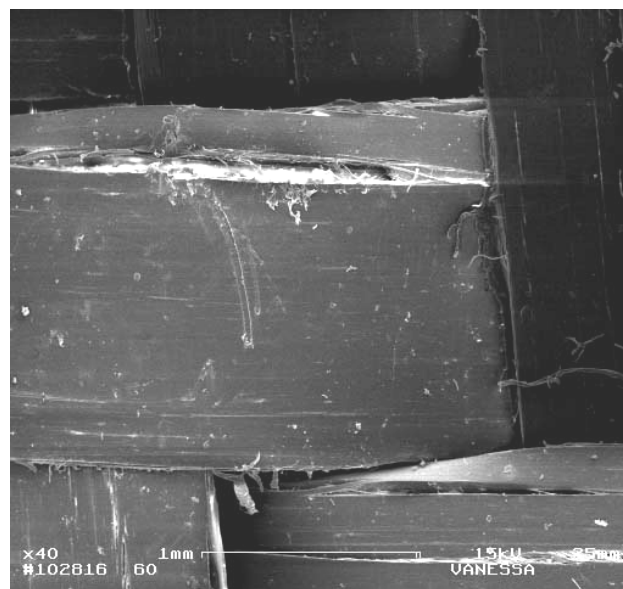


(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.5 - Fotomicrografia da Amostra A com 3200 horas de degradação por lixiviação contínua.

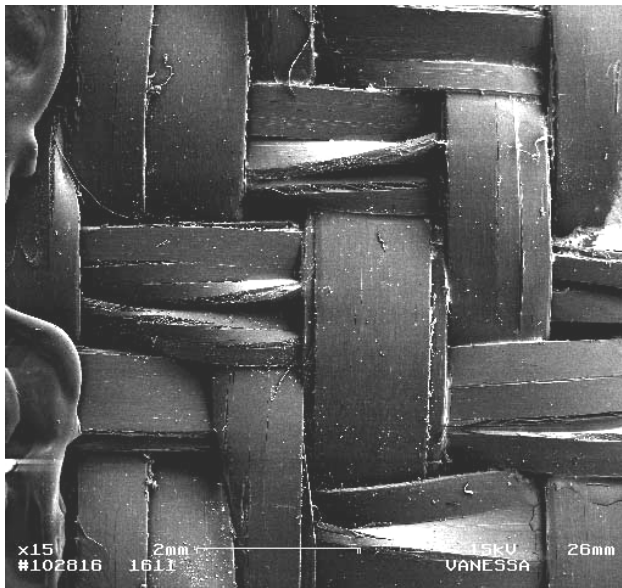


(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

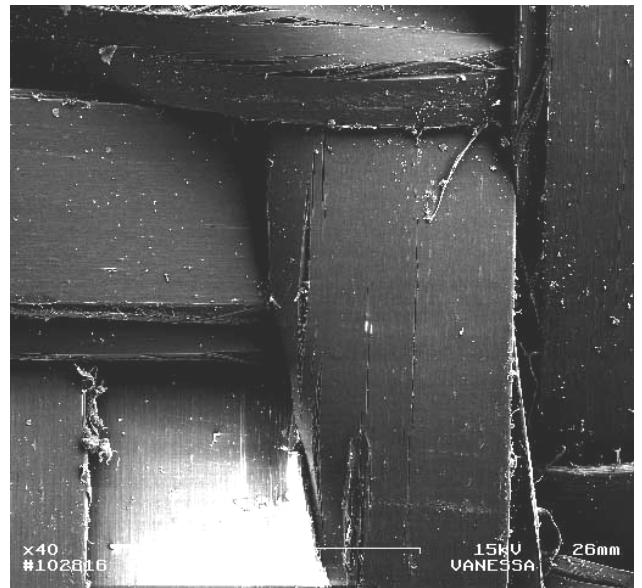


(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.6 - Fotomicrografia da Amostra A com 2000 horas de degradação por radiação ultravioleta.

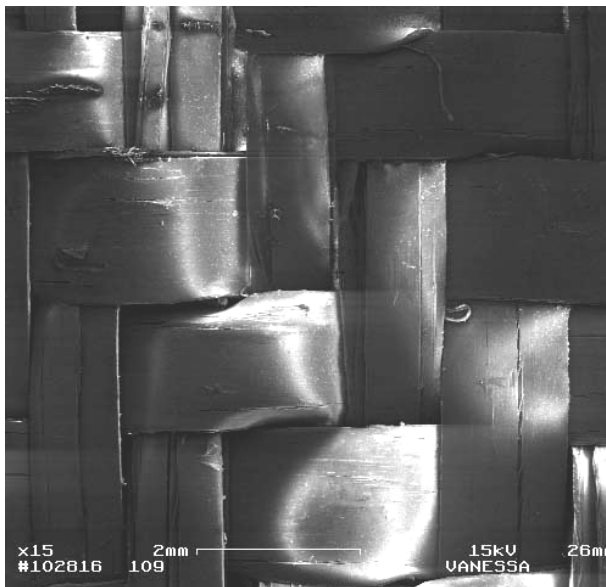


(a) amostra intacta, aumentada 15 vezes.

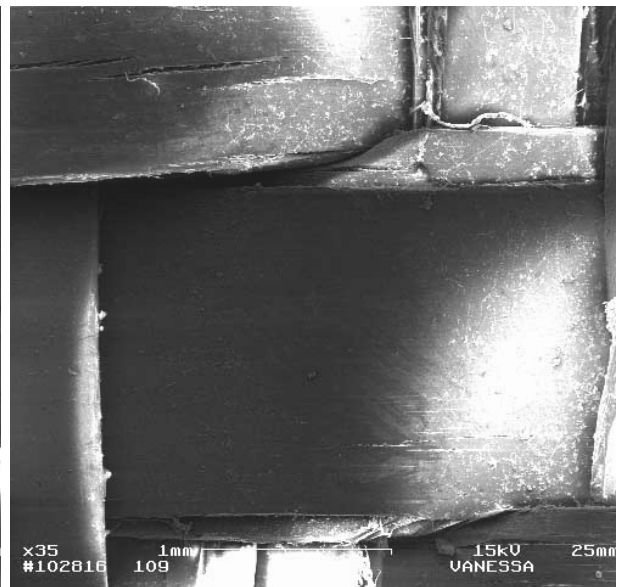


(b) amostra intacta, aumentada 40 vezes.

Figura 5.7 - Fotomicrografia da Amostra B livre de degradação (intacta).

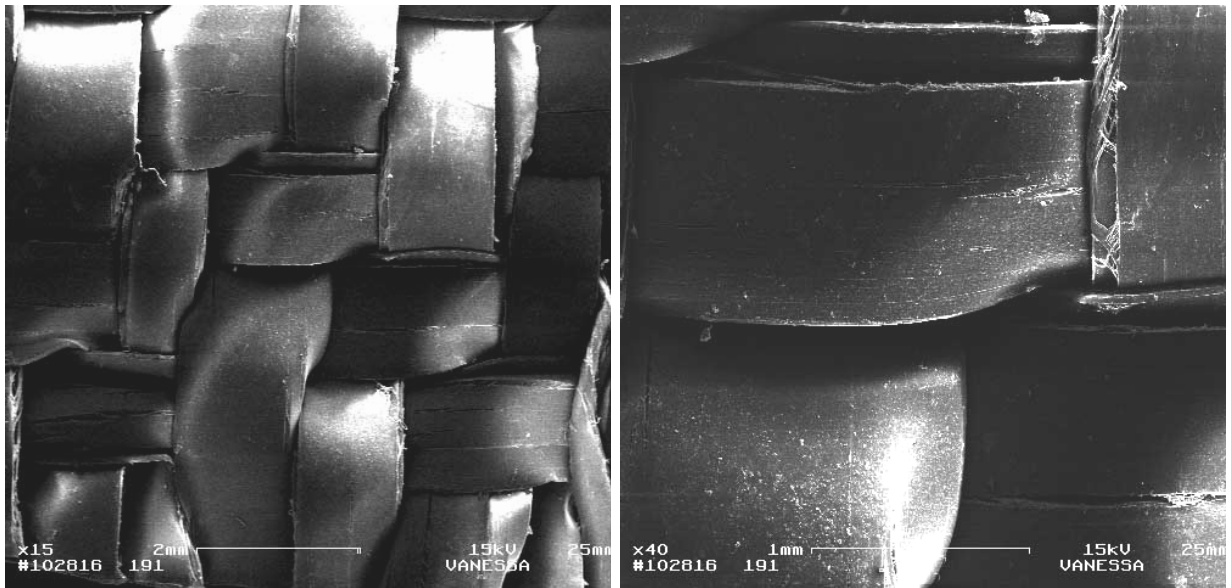


(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.



(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

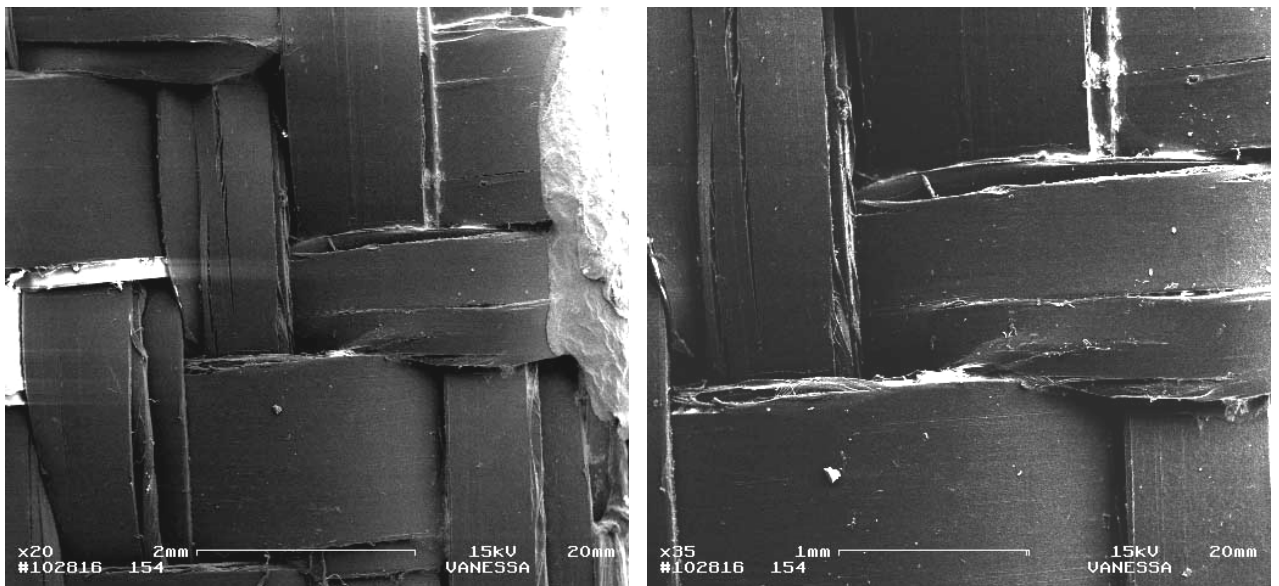
Figura 5.8 - Fotomicrografia da Amostra B com 420 dias de degradação natural.



(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

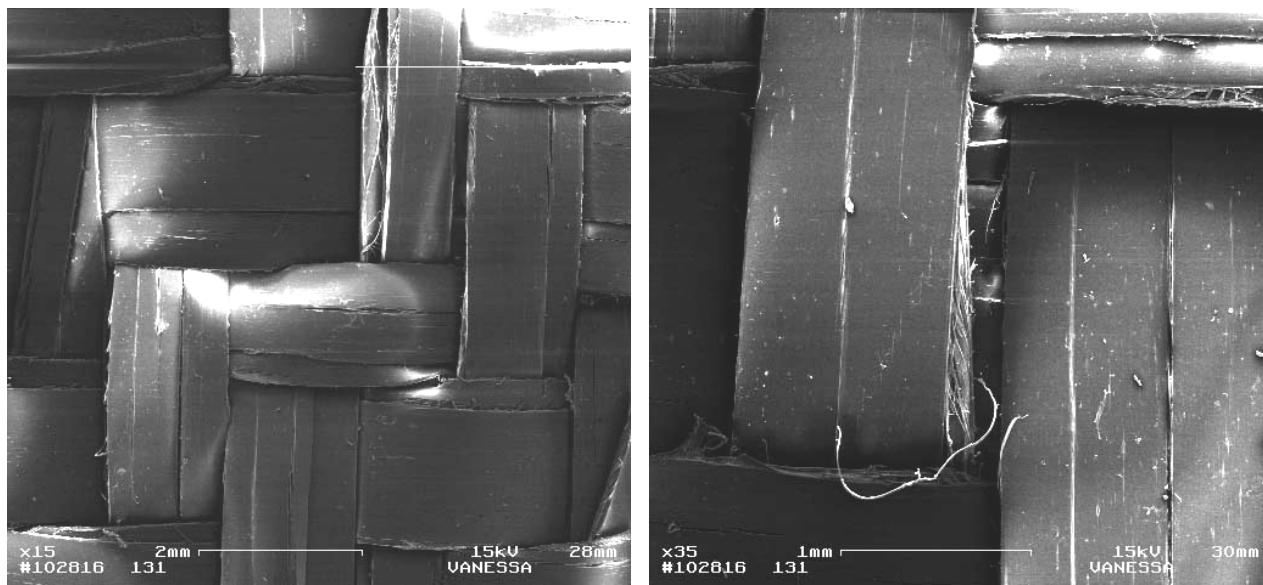
Figura 5.9 - Fotomicrografia da Amostra B com 720 horas de degradação por ciclos de saturação e secagem.



(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.10 - Fotomicrografia da Amostra B com 3200 horas de degradação por lixiviação contínua.



(a) amostra degradada, aumentada 15 vezes.

(b) amostra degradada, aumentada 40 vezes.

Figura 5.11 - Fotomicrografia da Amostra B com 2000 horas de degradação por radiação ultravioleta.

5.3 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A seguir são apresentados os resultados e as análises dos resultados dos ensaios de resistência à tração não-confinada realizados nos materiais de estudo. Faz-se, inicialmente, a apresentação dos resultados dos ensaios nos materiais intactos, degradados no campo e no laboratório e posteriormente discutem-se detalhadamente os resultados obtidos. Uma comparação entre o comportamento dos materiais degradados no campo e no laboratório, buscando definir parâmetros para previsão de comportamento dos materiais estudados a longo prazo, é apresentada no Capítulo 6.

Os resultados dos ensaios de tração não-confinada são apresentados por meio de curvas carga de tração vs. deformação. A partir da repetição de ensaios em uma mesma amostra foi possível a determinação de curvas carga de tração vs. deformação médias representativas do comportamento dos geotêxteis. A determinação das curvas médias seguiu o seguinte procedimento:

- Para cada valor de deformação são determinados os valores médios da carga de tração utilizando-se os resultados dos ensaios em diferentes corpos de prova de uma mesma amostra;
- Determinação da carga de ruptura e deformação na ruptura médios;

- Ajuste de curva passando pelos pontos de cargas de tração médias para cada valor de deformação e pelo ponto de carga de ruptura e deformação na ruptura médios.

As figuras 5.12 e 5.13 ilustram as curvas carga vs. deformação resultantes dos ensaios de tração para as amostras intactas, utilizadas para obtenção das curvas médias apresentadas na Figura 5.14. Destaca-se que estas curvas servem como referência para a avaliação da evolução da degradação dos materiais estudados.

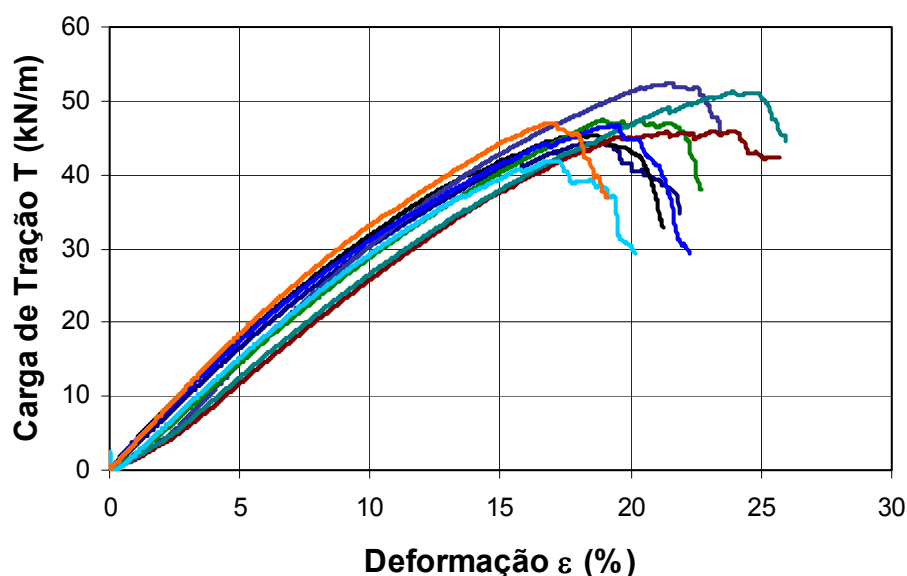


Figura 5.12 - Curvas carga vs. deformação em ensaios de tração não-confinada da Amostra A, intacta.

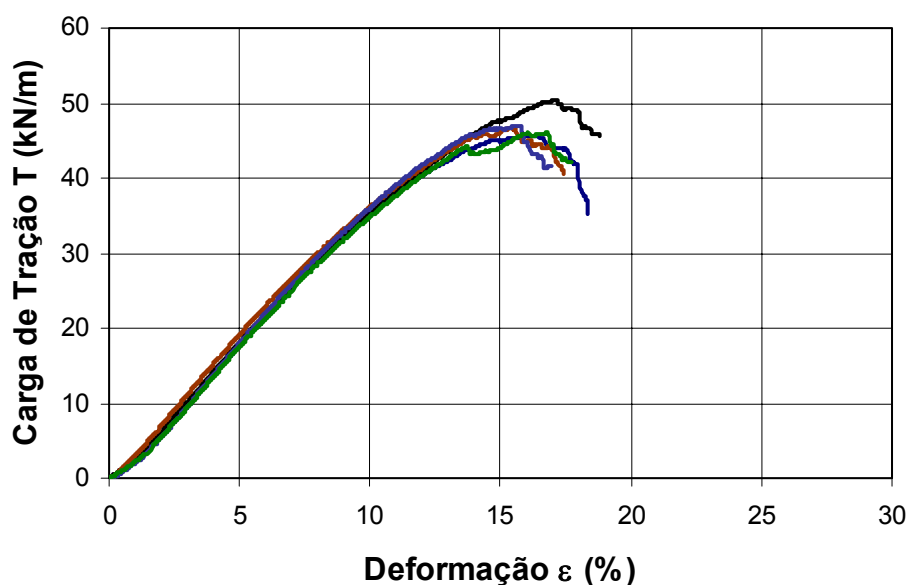


Figura 5.13 - Curvas carga vs. deformação em ensaios de tração não-confinada da Amostra B, intacta.

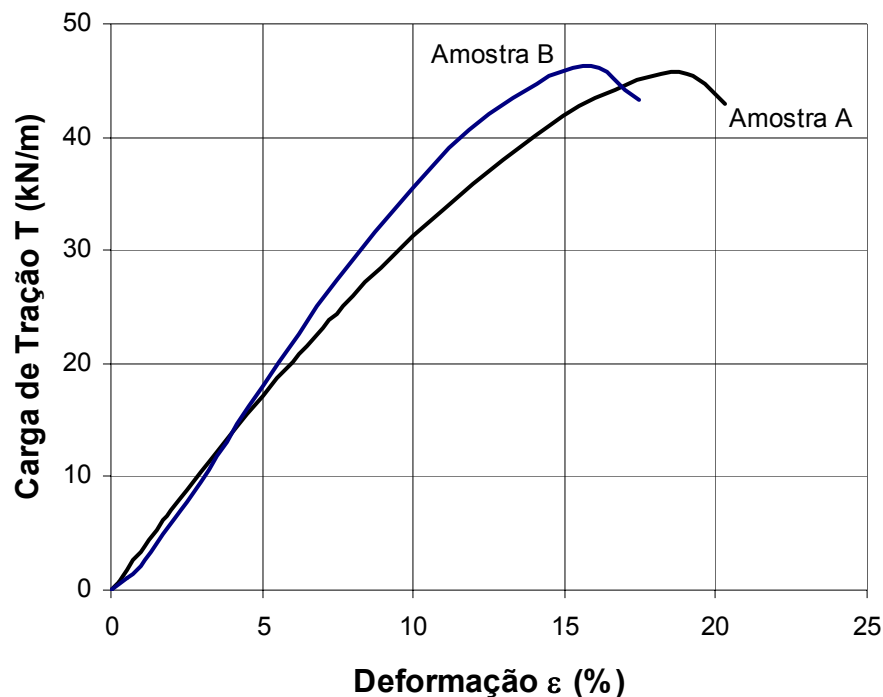


Figura 5.14 - Curvas carga vs. deformação médias das amostras A e B, intactas.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam a variação da carga de ruptura T_f , coeficiente de variação CV_{Tf} da carga T_f , a deformação na ruptura ϵ_f e o coeficiente de variação CV_{ϵ_f} da deformação ϵ_f com os diferentes tipos e intensidades de degradação, obtidos a partir das curvas médias resultantes dos ensaios de resistência à tração para as amostras A e B, respectivamente. O coeficiente de variação CV é definido pela razão entre o desvio padrão e a média da carga ou deformação na ruptura obtida nos diferentes ensaios.

A partir das curvas carga de tração vs. deformação médias das amostras degradadas naturalmente no campo e no laboratório foram calculados também os valores de rigidezes segundo diferentes critérios de determinação (tabelas 5.3 e 5.4). Apresentam-se os valores de rigidez secante das amostras com 2%, 5% e 10% de deformação, segundo as recomendações da norma para a determinação da resistência à tração não-confinada de faixa larga (ABNT, 1993) (Figura 5.15). Mostram-se, também, os valores da rigidez secante e tangente para 50% da carga de ruptura T_f e a rigidez secante no início da plastificação J_{sec_f} (Figuras 5.16). A rigidez final foi determinada no ponto de maior curvatura da curva rigidez vs. T/T_f (Figura 5.18), onde T é a carga de tração ao longo do ensaio, tomada imediatamente antes da ruptura, como ilustrado na Figura 5.16. Ressalta-se que o

cálculo de várias rigidezes teve como objetivo obter os parâmetros representativos dos efeitos da degradação, buscando definir correlações entre os procedimentos de degradação no campo e no laboratório.

Tabela 5.1 - Valores da carga, coeficiente de variação e deformação na ruptura para a Amostra A.

Tipo e Intensidade de Degradação		T_f (kN/m)	CV_{T_f} (%)	ε_f (%)	CV_{ε_f} (%)
<i>Intacto</i>		45,81±0,90	1,96	18,80±0,93	4,93
<i>Alterado naturalmente no campo</i>	90 dias	48,57±1,56	3,21	17,99±0,76	4,25
	180 dias	42,12±2,21	5,24	15,73±1,75	11,15
	420 dias	37,44±2,57	6,85	15,82±1,25	7,91
<i>Alterado por Saturação e Secagem</i>	100 horas	55,59±2,87	5,15	37,63±5,30	14,08
	180 horas	51,63±1,49	2,89	38,69±2,27	5,87
	360 horas	37,96±1,22	3,20	26,29±2,01	7,63
	720 horas	33,17±2,66	8,01	24,94±1,56	6,24
<i>Alterado por Lixiviação Contínua</i>	200 horas	50,66±2,28	4,50	27,28±2,12	7,76
	400 horas	54,09±2,63	4,86	25,90±2,23	8,62
	800 horas	47,91±1,94	4,04	21,74±0,98	4,49
	1600 horas	51,72±2,57	4,96	24,39±1,13	4,64
	3200 horas	49,21±1,60	3,25	22,40±1,29	5,74
<i>Alterado por Radiação Ultravioleta</i>	240 horas	47,34±4,20	8,87	18,92±2,15	11,37
	480 horas	48,18±0,50	1,04	18,89±1,01	5,32
	1000 horas	46,38±2,30	4,95	17,25±0,54	3,13
	2000 horas	39,52±1,03	2,61	13,12±0,64	4,90

5.3.1 – Dispersão e Representatividade dos Resultados

Os valores de CV apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2, indicam que a degradação no campo ou no laboratório não afeta sistematicamente a dispersão dos valores de carga de tração e deformação na ruptura. Isto indica que os resultados experimentais obtidos podem ser representativos do comportamento dos materiais frente aos processos de degradação no campo ou no laboratório. No entanto, nota-se que o eventual aumento do valor do coeficiente CV, para os materiais degradados no campo ou no laboratório em relação ao material intacto, indica um aumento da heterogeneidade dos materiais devido à degradação. Isto pode indicar que a degradação ocorreu de forma não homogênea nos materiais estudados.

Tabela 5.2 - Valores da carga, coeficiente de variação e deformação na ruptura para a Amostra B.

Tipo e Intensidade de Degradação		T_f (kN/m)	CV_{T_f} (%)	ε_f (%)	CV_{ε_f} (%)
<i>Intacto</i>		46,30±2,44	5,26	15,59±1,24	7,95
<i>Alterado naturalmente no campo</i>	90 dias	47,90±0,51	1,05	13,07±0,46	3,49
	180 dias	42,80±1,24	2,90	12,22±0,84	6,84
	420 dias	40,54±1,33	3,28	12,60±0,58	4,63
<i>Alterado por Saturação e Secagem</i>	100 horas	52,07±1,64	3,15	31,67±1,36	4,28
	180 horas	47,34±3,17	6,88	27,73±2,63	9,50
	360 horas	53,41±1,97	3,68	32,98±1,91	5,80
	720 horas	55,06±2,46	4,46	38,00±2,67	7,02
<i>Alterado por Lixiviação Contínua</i>	200 horas	45,50±1,11	2,44	19,81±0,91	4,60
	400 horas	47,24±0,38	0,80	22,87±1,19	5,22
	800 horas	51,05±3,54	6,94	25,47±2,35	9,24
	1600 horas	49,04±1,66	3,38	23,82±2,66	11,18
	3200 horas	48,79±1,22	2,50	24,91±2,98	11,95
<i>Alterado por Radiação Ultravioleta</i>	240 horas	45,48±2,28	5,02	19,11±1,67	8,75
	480 horas	47,36±1,67	3,54	18,86±1,28	6,79
	1000 horas	43,52±1,72	3,95	16,08±1,05	6,52
	2000 horas	44,67±1,26	2,81	19,57±1,92	9,79

Tabela 5.3 - Variação da rigidez quanto ao tipo e intensidade de degradação da Amostra A.

Tipo e intensidade de degradação (horas)		Rigidez secante em kN/m e T/T_f no final		Rigidez em kN/m a 50% de T/T_f		Rigidez secante em kN/m nas deformações iguais a		
		T/T_f (%)	$Jsec_f$	Jtg	$Jsec$	2%	5%	10%
<i>Intacto</i>		87	205,00	301,02	332,34	351,12	342,39	313,09
<i>Natural</i>	2160	86	299,70	342,63	301,65	188,58	272,61	306,12
	4320	84	294,00	339,01	293,19	168,41	270,37	298,21
	10200	88	260,00	292,82	250,45	146,94	227,74	259,19
<i>Saturação e Secagem</i>	100	92	153,25	175,61	146,68	60,74	93,16	120,65
	180	83	141,41	167,11	135,62	80,51	88,45	110,52
	360	88	150,97	183,30	134,87	81,28	89,79	116,78
	720	93	141,08	172,95	126,45	81,53	88,56	113,05
<i>Lixiviação Contínua</i>	200	95	199,82	235,85	217,50	129,86	180,33	214,92
	400	85	235,00	266,04	240,12	139,81	197,85	237,66
	800	87	245,00	285,12	247,76	133,58	202,42	249,26
	1600	95	230,00	265,66	240,19	123,99	192,70	238,95
	3200	95	231,30	280,99	244,41	125,65	197,64	244,34
<i>Radiação Ultravioleta</i>	240	68	300,00	320,71	298,68	148,38	280,12	297,99
	480	97	279,40	329,57	313,71	205,36	300,08	311,56
	1000	83	315,00	345,44	315,35	190,79	295,98	316,30
	2000	88	339,00	382,18	354,75	242,53	352,62	339,86

Nota: T/T_f é a relação entre a carga de tração T e a carga de tração na ruptura T_f , Jtg é a rigidez tangente, $Jsec$ a rigidez secante e $Jsec_f$ a rigidez secante no início da plastificação.

Tabela 5.4 - Variação da rigidez quanto ao tipo e intensidade de degradação da Amostra B.

Tipo e intensidade de degradação (horas)	Rigidez secante em kN/m e T/T_f no final		Rigidez em kN/m a 50% de T/T_f		Rigidez secante em kN/m nas deformações iguais a		
	T/T_f (%)	J_{sec_f}	J_{tg}	J_{sec}	2%	5%	10%
<i>Intacto</i>	90	336,00	388,98	362,24	293,83	359,92	336,47
<i>Natural</i>	2160	85	405,78	430,34	439,28	376,45	440,13
	4320	90	387,40	403,53	436,53	438,88	435,92
	10200	88	365,00	396,47	390,07	338,86	387,63
<i>Saturação e Secagem</i>	100	91	180,00	222,40	177,42	89,04	110,86
	180	76	193,90	217,56	191,36	96,26	140,85
	360	93	176,70	214,92	172,93	90,75	108,73
	720	95	154,00	196,71	155,19	75,00	91,94
<i>Lixiviação Contínua</i>	200	85	255,00	307,68	245,96	127,61	191,82
	400	93	220,45	266,31	224,28	109,66	168,75
	800	98	205,48	254,17	211,57	91,13	145,85
	1600	85	230,00	269,85	221,39	112,90	169,14
	3200	86	209,00	250,17	202,29	76,96	131,40
<i>Radiação Ultravioleta</i>	240	78	280,00	308,67	275,22	131,05	247,82
	480	92	271,30	307,73	283,92	146,50	259,69
	1000	94	290,94	340,13	293,69	122,22	265,09
	2000	97	241,00	283,13	247,19	140,50	214,28

Nota: T/T_f é a relação entre a carga de tração T e a carga de tração na ruptura T_f , J_{tg} é a rigidez tangente, J_{sec} a rigidez secante e J_{sec_f} a rigidez secante no início da plastificação.

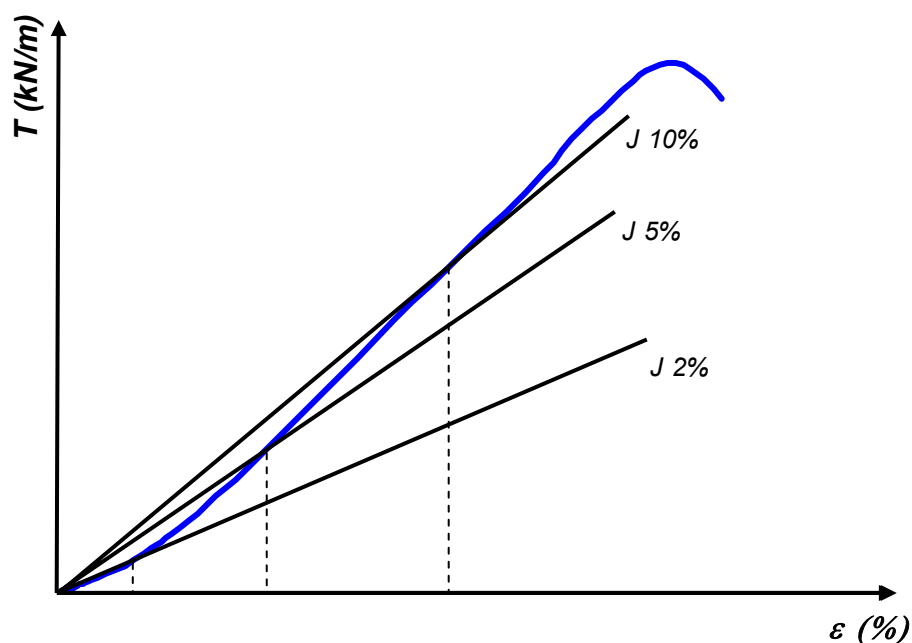


Figura 5.15 – Definição das rigidezes secantes a 2, 5 e 10 % da deformação.

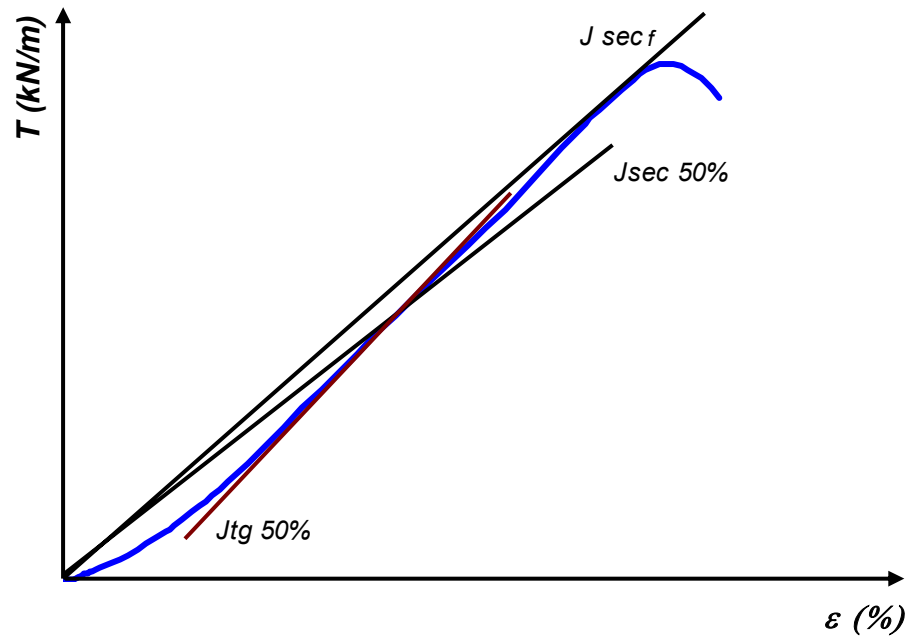


Figura 5.16 – Definição das rigidezes tangente e secante a 50 % da carga de ruptura e secante no início da plastificação.

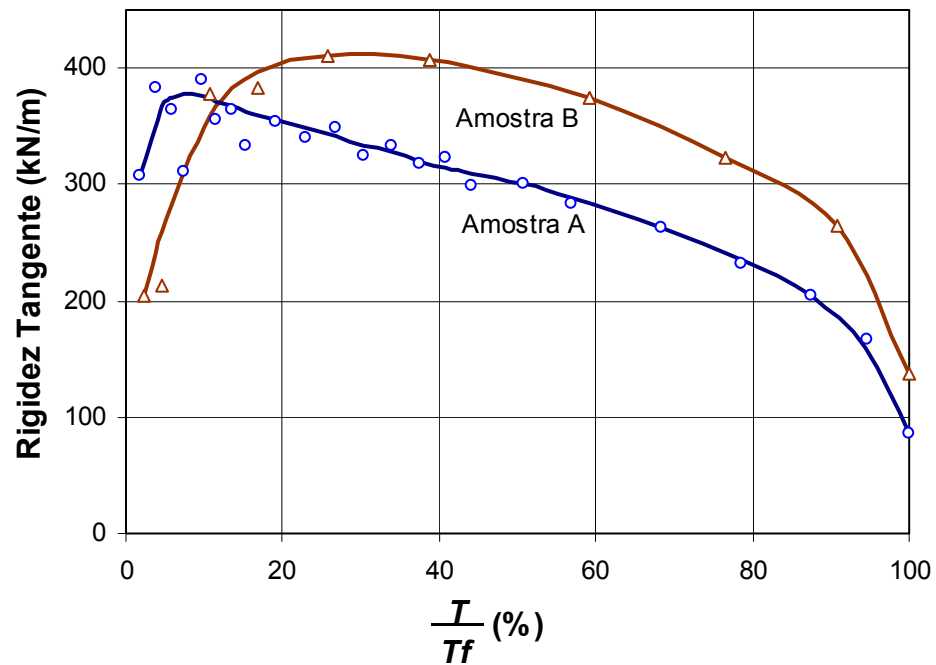


Figura 5.17 - Variação da rigidez tangente com a carga normalizada, amostras intactas.

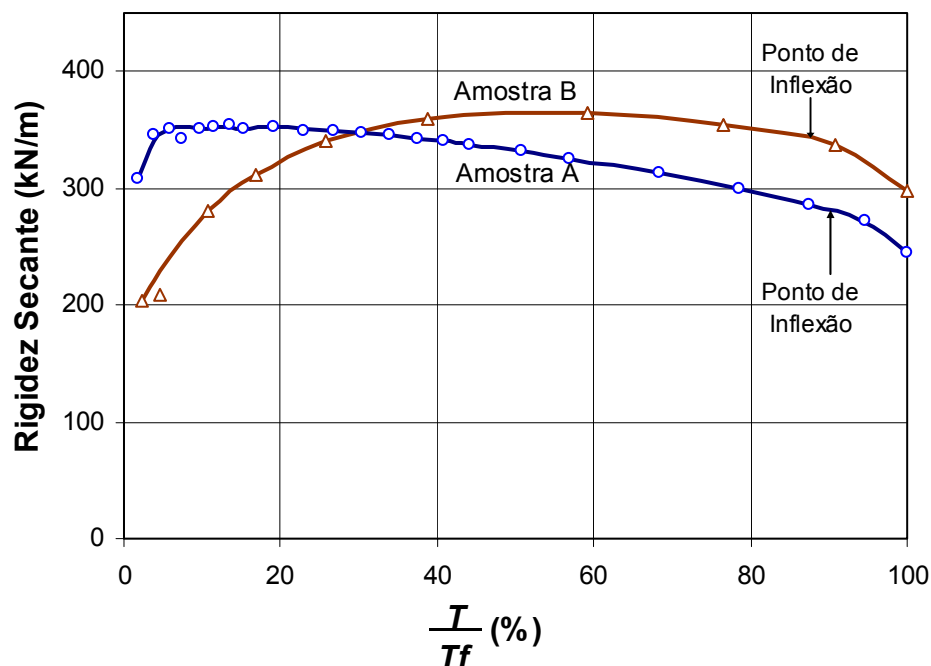


Figura 5.18 - Variação da rigidez secante com a carga normalizada, amostras intactas.

5.3.2 – Materiais Intactos

Observa-se que a Amostra A apresenta maior dispersão de resultados que a Amostra B (figuras 5.12 e 5.13). Além disto, nota-se, com o aumento da deformação, que a Amostra B apresenta menor deformabilidade que a Amostra A (Figura 5.14).

5.3.3 – Degradação Natural no Campo

As figuras 5.19 e 5.20 apresentam as variações da carga de tração com a deformação obtidas em ensaios de tração não-confinada para as amostras degradadas naturalmente no campo. Verifica-se que a quantidade de aditivos antioxidantes afeta significativamente e de forma distinta o comportamento carga de tração vs. deformação devido à degradação natural dos geotêxteis.

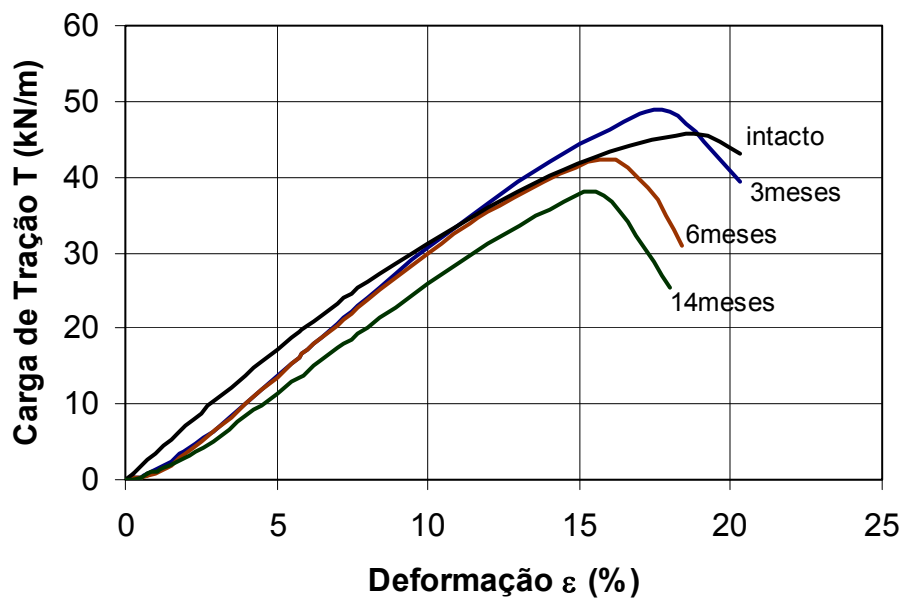


Figura 5.19 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra A.

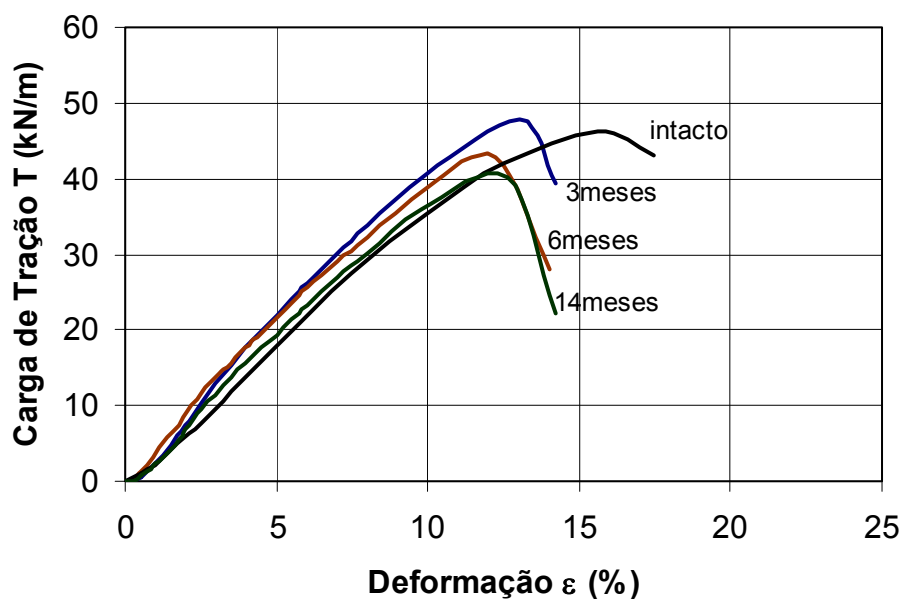


Figura 5.20 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra B.

As figuras 5.21 e 5.22 representam graficamente a variação da carga de tração e da deformação na ruptura com o tempo de degradação natural para as amostras A e B. De maneira geral, nota-se uma elevação dos valores da carga na ruptura para menores tempos de degradação e a redução da carga e da deformação para maiores tempos de degradação. A elevação da resistência para baixos tempos de

degradação se justifica, possivelmente, por alterações na estrutura química do geotêxtil, devido à cristalização de algumas moléculas mal cristalizadas no processo de fabricação. Além disto, a redução da deformação na ruptura com o aumento da degradação está em concordância com a literatura.

Destaca-se que a perda de resistência e a redução da deformação na ruptura para maiores tempos de degradação indicam o enrijecimento do geotêxtil.

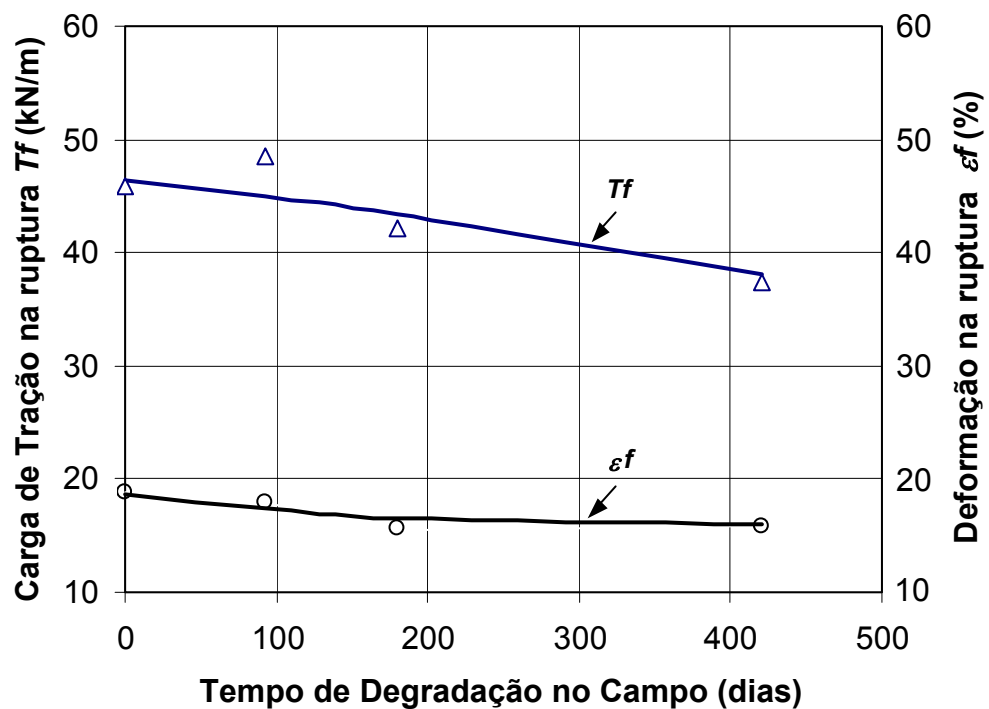


Figura 5.21 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra A.

5.3.4 – Degradação Acelerada no Laboratório

5.3.4.1 – Carga de Tração vs. Deformação

As figuras 5.23 a 5.28 apresentam a variação da carga de tração vs. deformação na ruptura obtidas por meio dos ensaios de resistência à tração não-confinada para as amostras degradadas no laboratório por ciclos de saturação e secagem, condensação e exposição à radiação ultravioleta e lixiviação contínua, respectivamente. Nota-se que os procedimentos de degradação no laboratório afetam significativamente e diferenciadamente o comportamento carga de tração vs. deformação dos geotêxteis. De modo geral, a Amostra B é mais influenciada que a

Amostra A pela degradação. Isto indica que a quantidade de aditivos antioxidantes afeta o comportamento carga de tração vs. deformação protegendo o material da degradação. Verifica-se que a degradação por ciclos de saturação e secagem foi a que provocou maiores modificações do comportamento carga de tração vs. deformação.

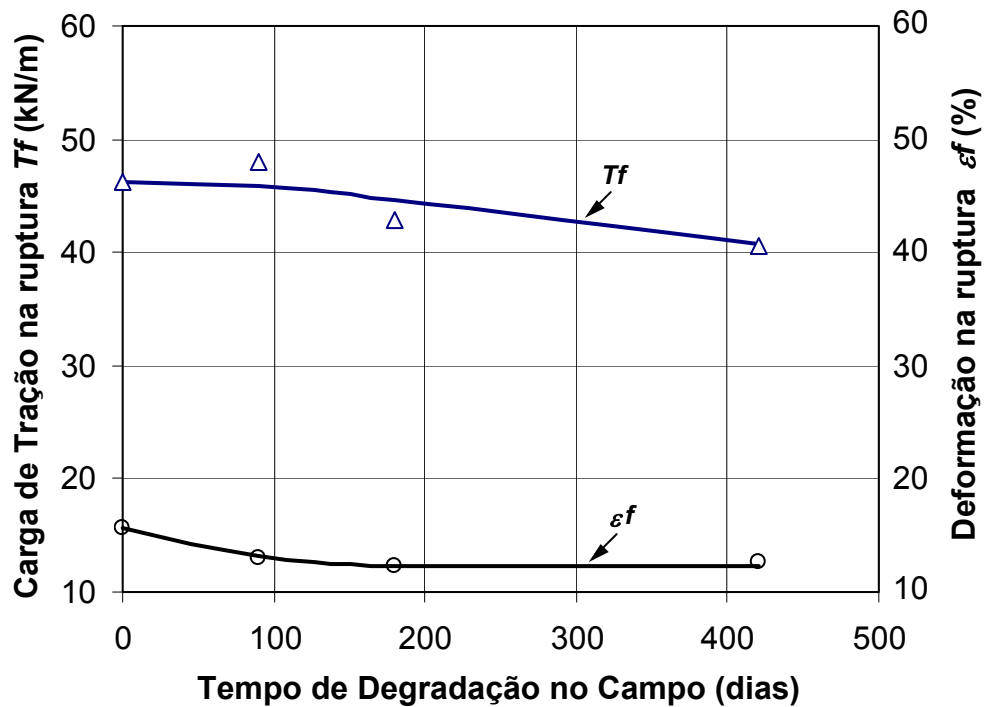
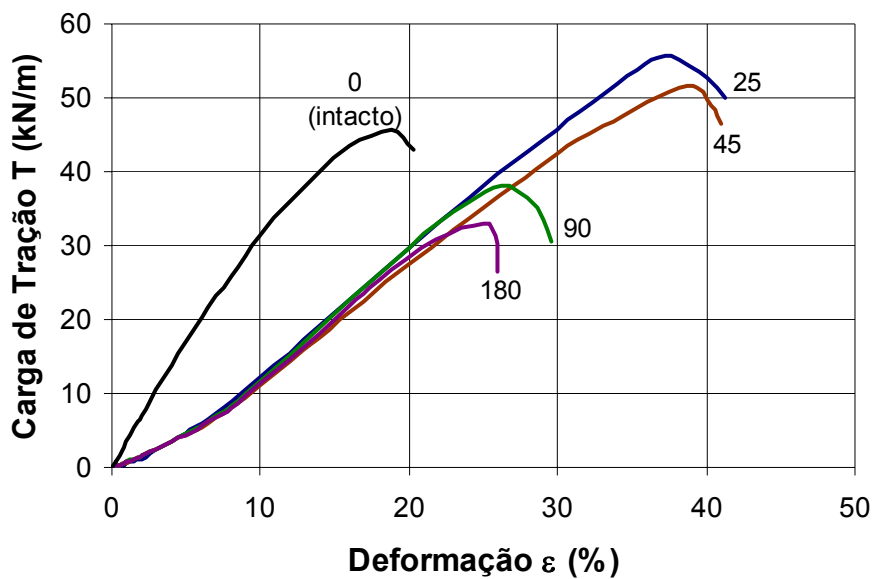


Figura 5.22 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra B.

A Amostra A, degradada pela exposição à condensação e à radiação ultravioleta não apresentou mudança significativa para baixos tempos de degradação, enquanto que em elevados tempos observa-se o enrijecimento do material, em comparação com o intacto. A degradação da Amostra B por condensação e exposição à radiação ultravioleta não alterou significativamente a carga e propiciou um acréscimo na deformação.

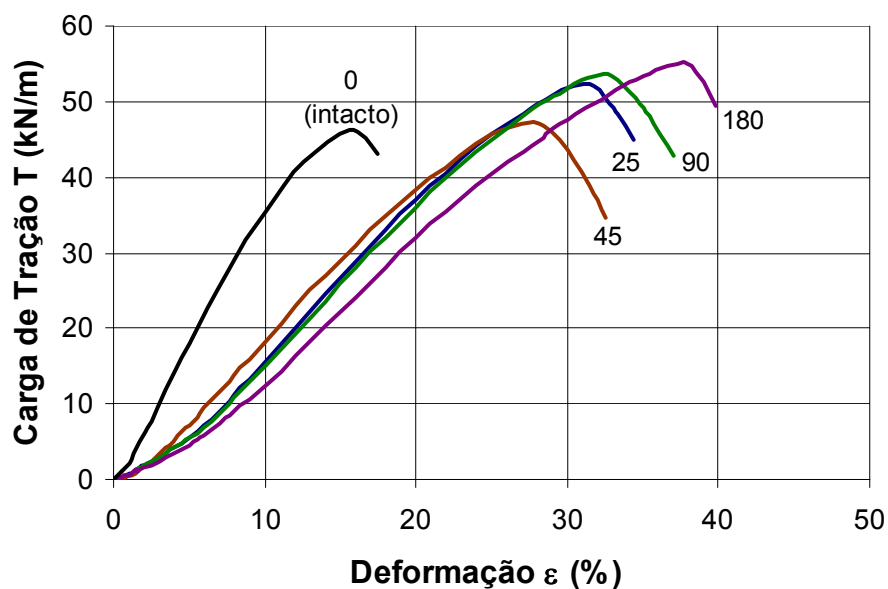
Destaca-se que a perda de resistência e a redução da deformação na ruptura para elevados tempos de degradação (Figura 5.23 e Figura 5.25) indicam uma tendência à fragilidade do geotêxtil com o aumento da intensidade de degradação.

De maneira geral, nota-se um aumento da carga e da deformação com o aumento do tempo de degradação por lixiviação contínua em ambas as amostras, sugerindo elevação nos valores destas propriedades em relação ao material intacto.



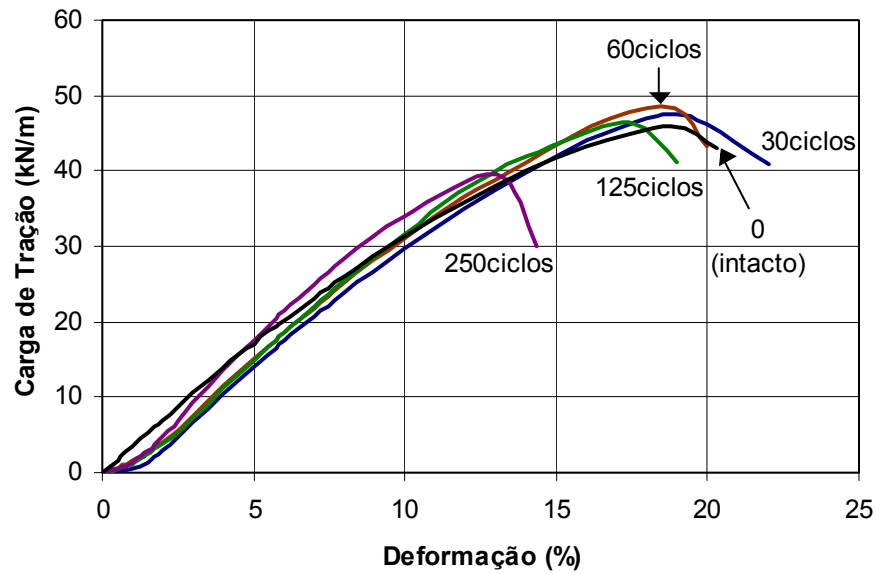
Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.23 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por ciclos de saturação e secagem, Amostra A.



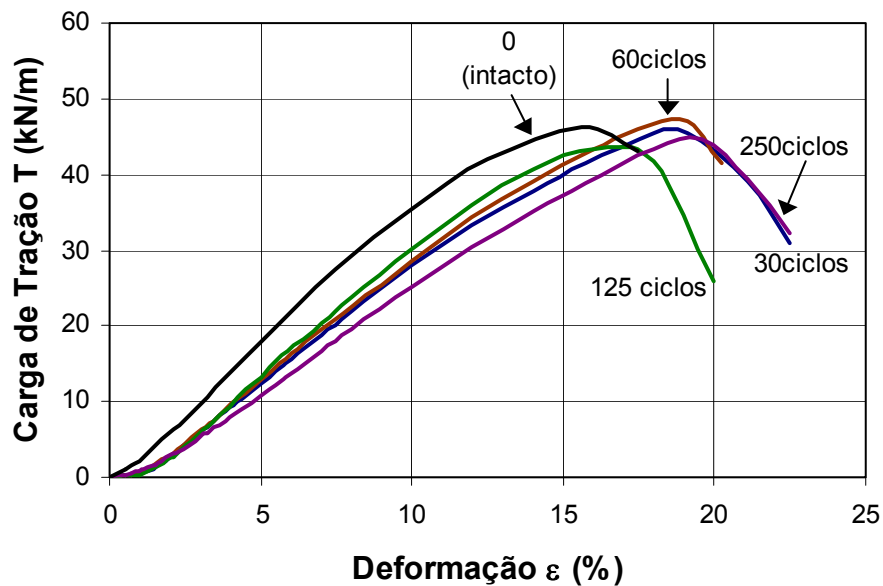
Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.24 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por ciclos de saturação e secagem, Amostra B.



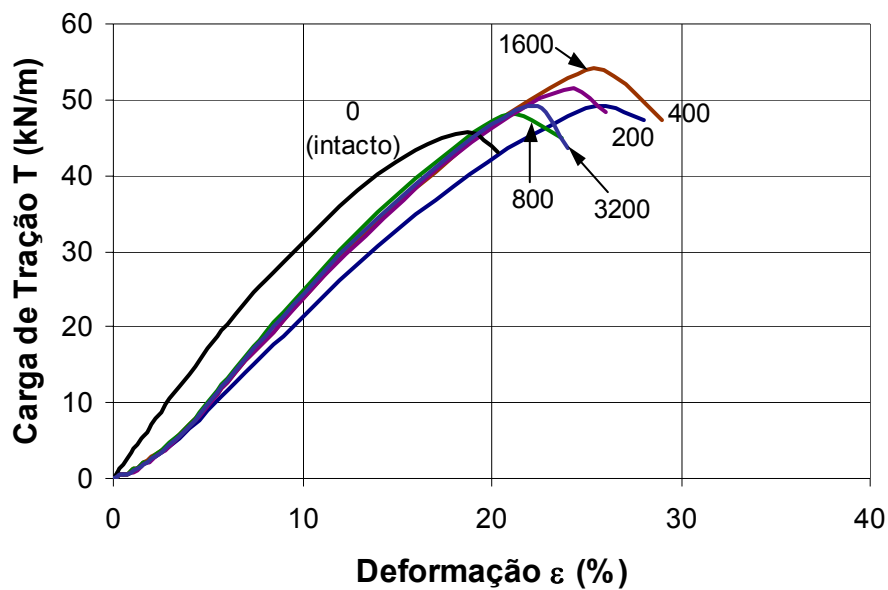
Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.25 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por condensação e exposição à radiação ultravioleta, Amostra A.



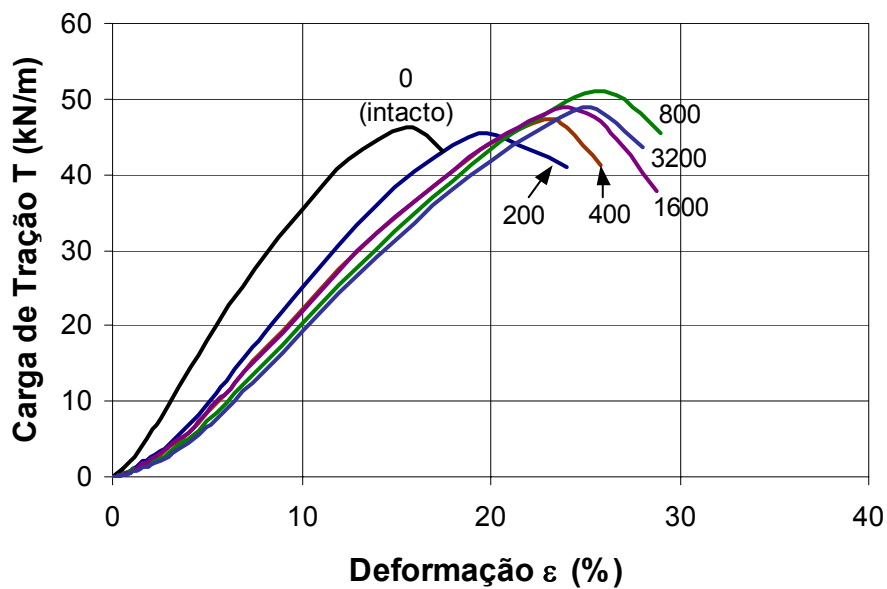
Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.26 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por condensação e exposição à radiação ultravioleta, Amostra B.



Nota: tempo de degradação em horas.

Figura 5.27 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por lixiviação contínua, Amostra A.



Nota: tempo de degradação em horas.

Figura 5.28 - Variação da carga de tração com a deformação do geotêxtil intacto e degradado por lixiviação contínua, Amostra B.

Dos resultados apresentados, nota-se que o comportamento carga de tração vs. deformação é significativamente afetado para baixos tempos de degradação, independentemente do processo de degradação.

5.3.4.2 – Carga de Tração e Deformação na Ruptura

As figuras 5.29 a 5.34 representam graficamente a variação da carga de tração e deformação na ruptura com o tempo de degradação no laboratório e no campo para as amostras A e B. Para a Amostra A (figuras 5.29, 5.31 e 5.33), nota-se o aumento da carga e deformação na ruptura para menores tempos de degradação e a redução da carga e deformação na ruptura com o aumento da degradação. As curvas carga de tração vs. deformação da Amostra B, degradada por ciclos de saturação e secagem (Figura 5.30), indicam aumento da carga e deformação na ruptura com o aumento do tempo de degradação, evidenciando o aumento dos valores das propriedades mecânicas do material. Isto provavelmente é devido a uma mudança na estrutura molecular da cadeia polimérica sob influência da temperatura. Observando-se as curvas carga de tração vs. deformação das figuras 5.29, 5.31 e 5.33, constata-se uma representatividade entre campo e laboratório para a Amostra A, que possibilita uma correlação entre parâmetros de campo e laboratório. No entanto, a Amostra B, de modo geral, não é representativa para uma correlação entre campo e laboratório, exceto para a carga de tração dos processos de degradação por lixiviação contínua e condensação e exposição à radiação ultravioleta.

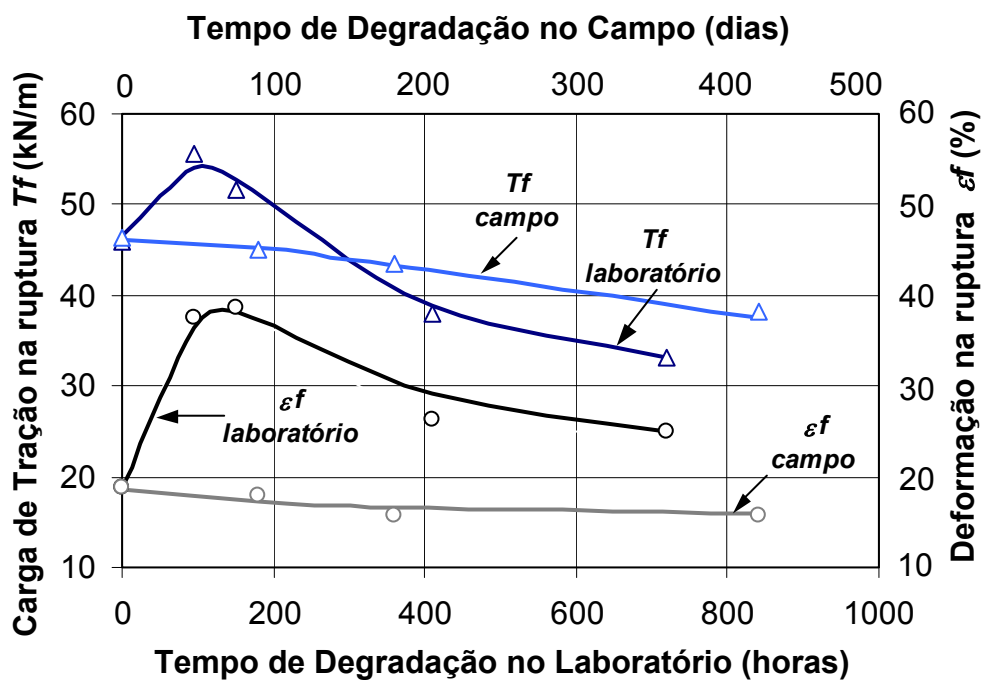


Figura 5.29 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem e natural no campo, para a Amostra A.

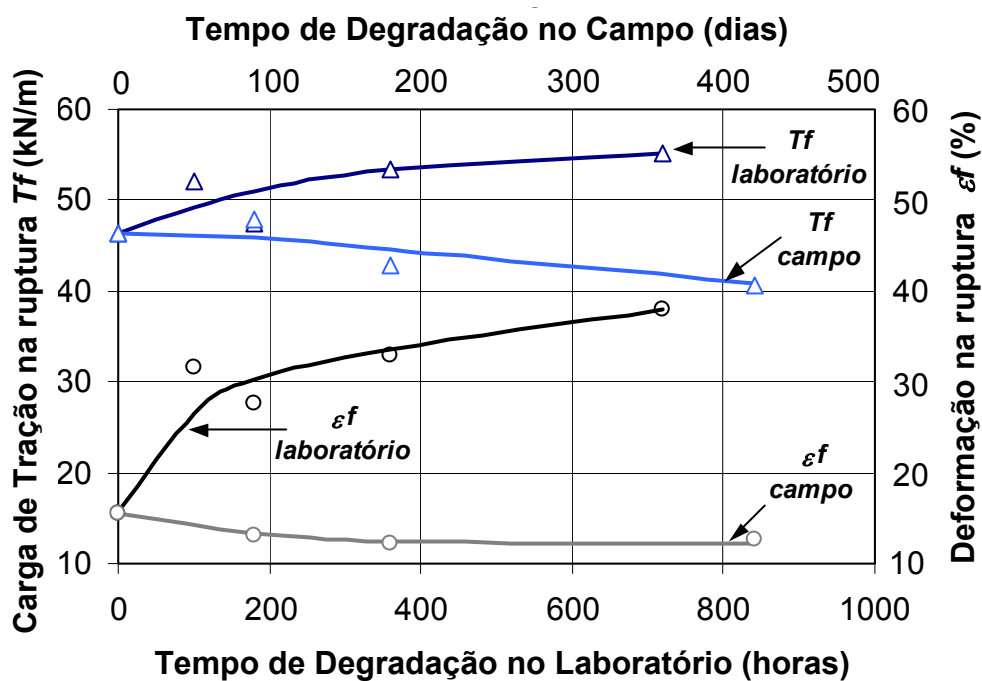


Figura 5.30 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem e natural no campo, para a Amostra B.

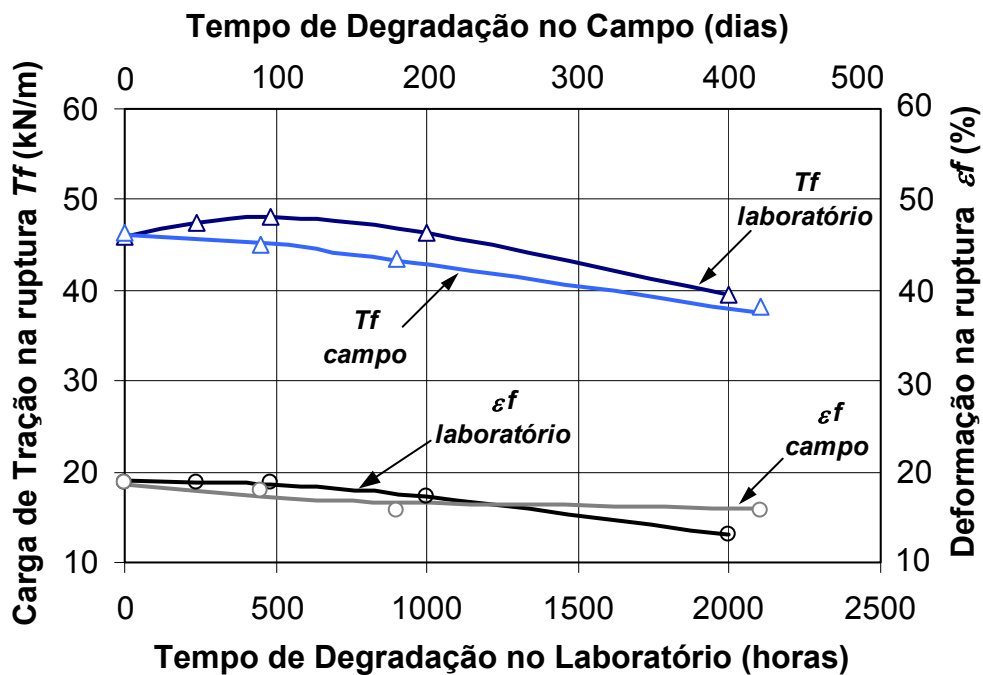


Figura 5.31 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta no equipamento C-UV B e natural no campo, para a Amostra A.

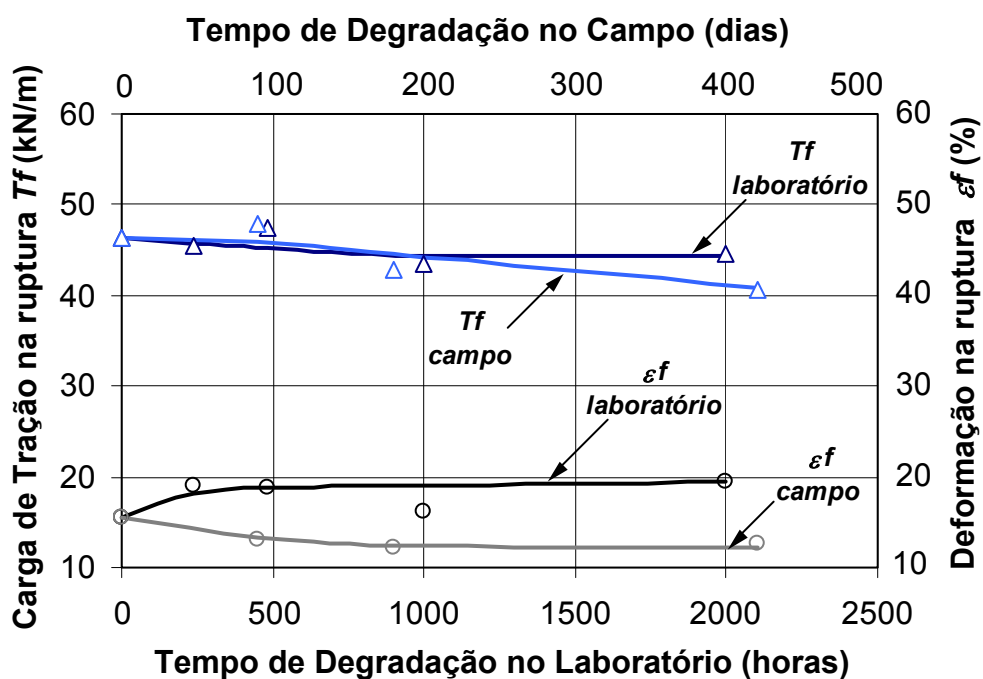


Figura 5.32 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta no equipamento C-UV B e natural no campo, para a Amostra B.

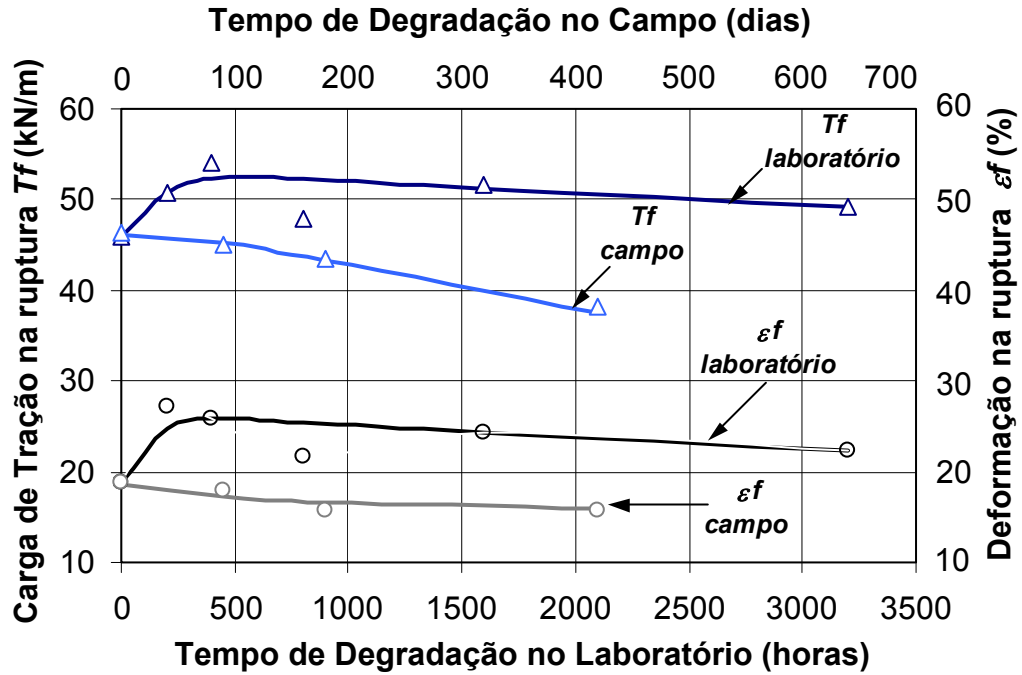


Figura 5.33 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet e natural no campo, para a Amostra A.

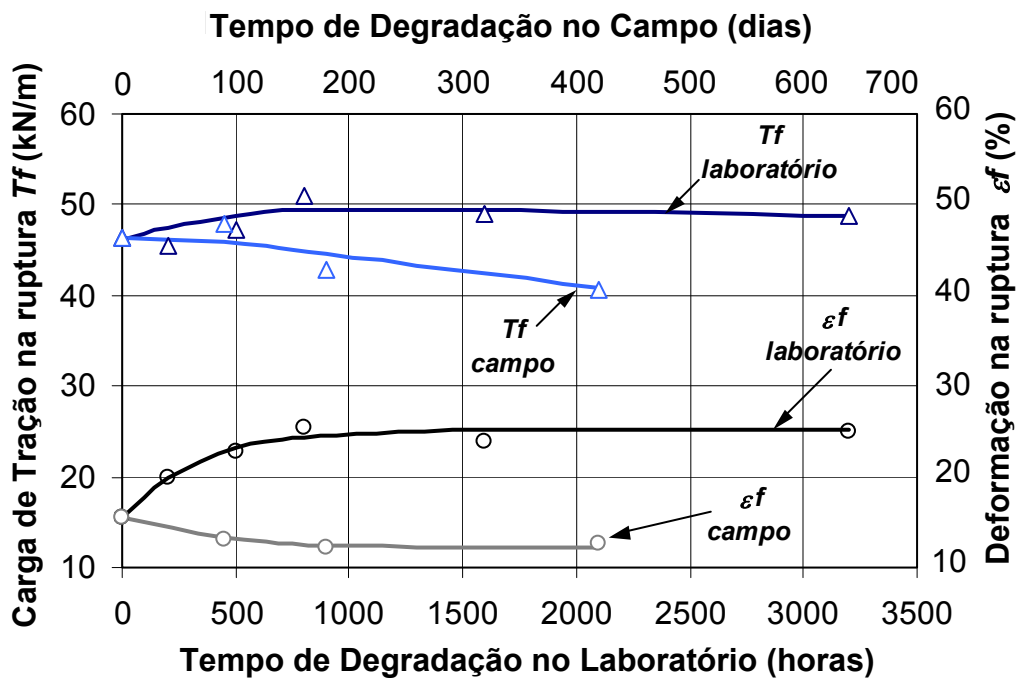


Figura 5.34 - Variação da carga e deformação na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet e natural no campo, para a Amostra B.

5.3.4.3 – Efeito da Degradação na Rigidez

As figuras 5.35 a 5.46 mostram a variação dos diferentes tipos de rigidez calculada com o tempo de degradação.

A variação da rigidez com o tempo de degradação não é normalmente similar para os diferentes procedimentos de degradação. Além disto observa-se que a representatividade dos efeitos da degradação do material não é possível utilizando-se um único tipo de rigidez. Por exemplo, observando-se a Figura 5.35 nota-se que a rigidez tangente a 50% de T/T_f do material degradado pela exposição à radiação ultravioleta, que é representativa da condição a baixos níveis de degradação no campo, não representa a degradação natural quando se compara com os outros procedimentos de degradação no laboratório. Dos resultados obtidos nota-se que a variação da rigidez do material degradado no campo pode ser representada pela variação da rigidez do material degradado no laboratório nas seguintes condições: rigidez tangente a 50 % de T/T_f para a Amostra A degradada no C-UV B, rigidez secante a 50% de T/T_f da Amostra A para todos os procedimentos de degradação no laboratório, rigidez secante final para a Amostra A degradada no C-UV B, rigidez secante a 2%, 5 % e 10% de deformação para Amostra A em todos os procedimentos de degradação no laboratório.

Observando as figuras 5.35 a 5.46 que as variações de laboratório são similares entre si, exceto na Amostra A para a rigidez tangente a 50% de T/T_f , rigidez secante a 50% de T/T_f , rigidez secante final, rigidez secante a 5 % e 10% de deformação.

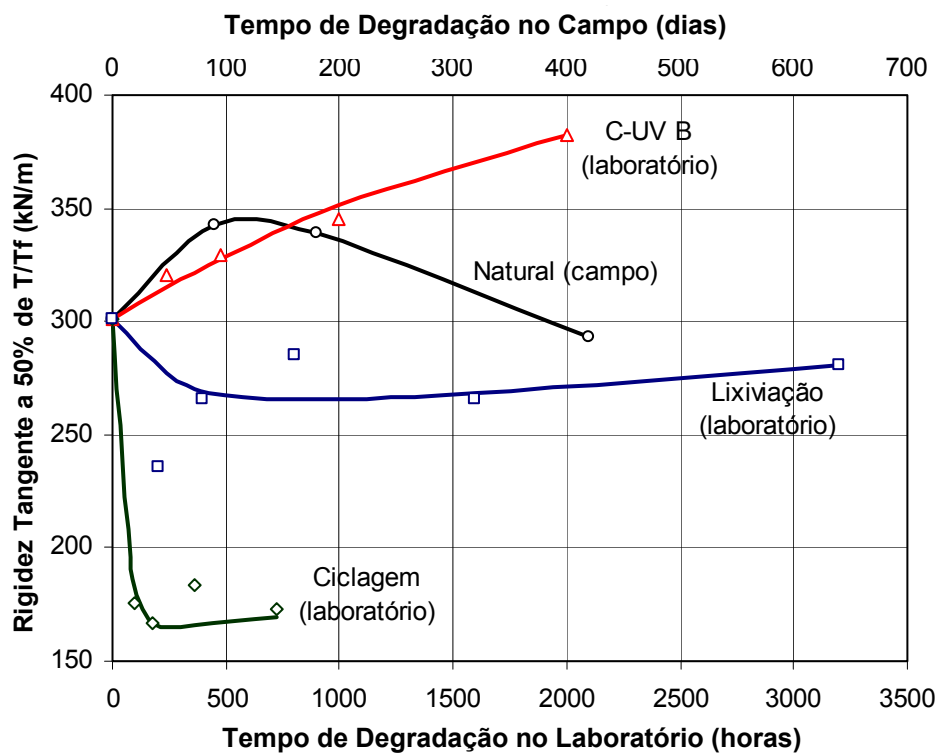


Figura 5.35 - Variação da rigidez tangente a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.

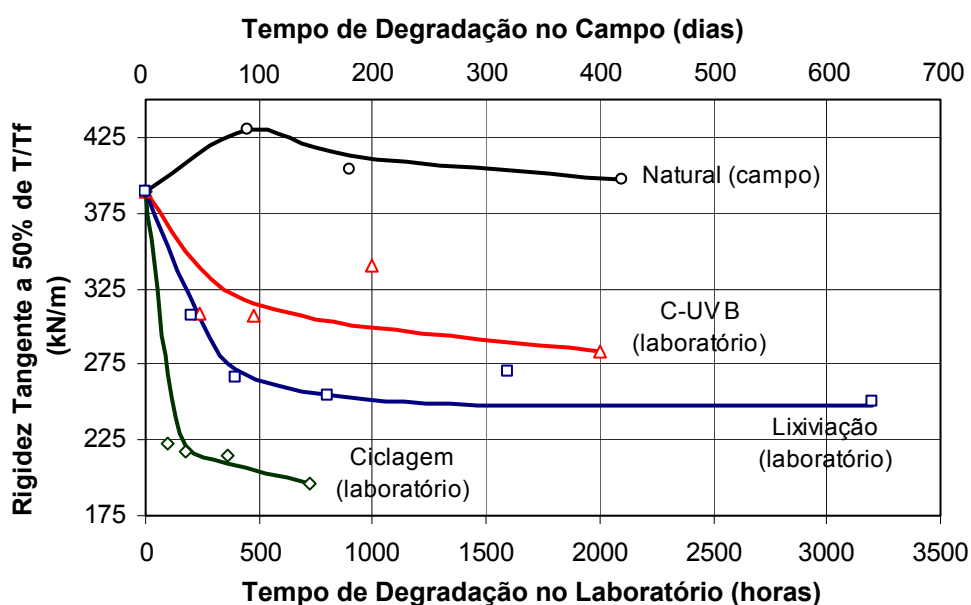


Figura 5.36 - Variação da rigidez tangente a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.

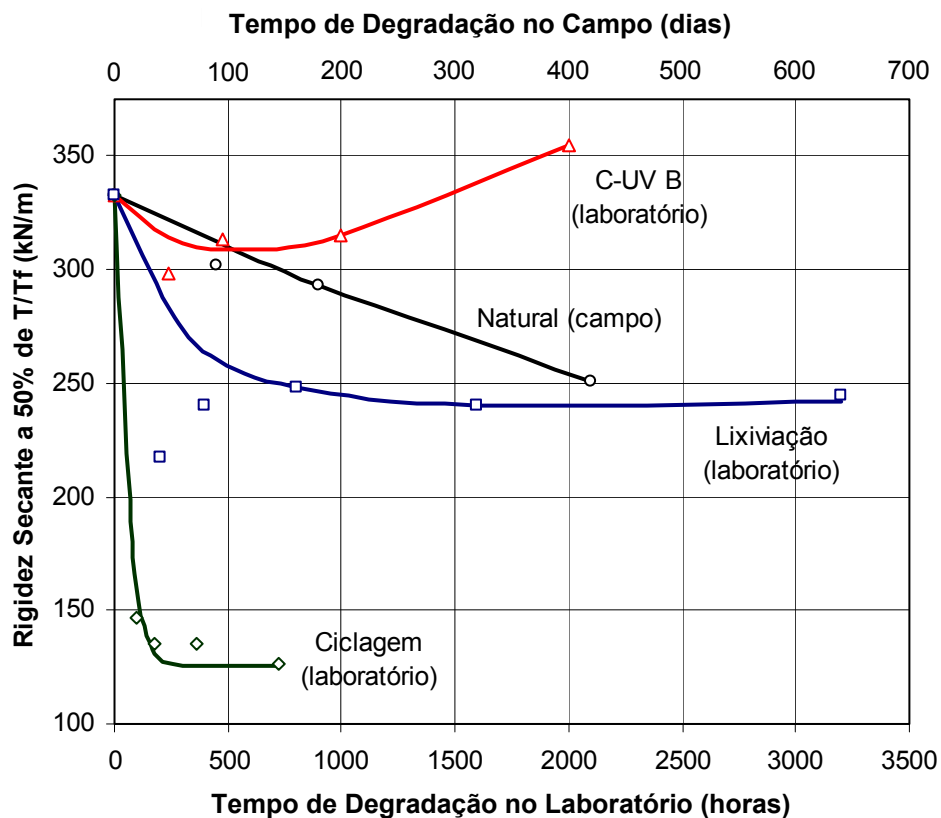


Figura 5.37 - Variação da rigidez secante a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.

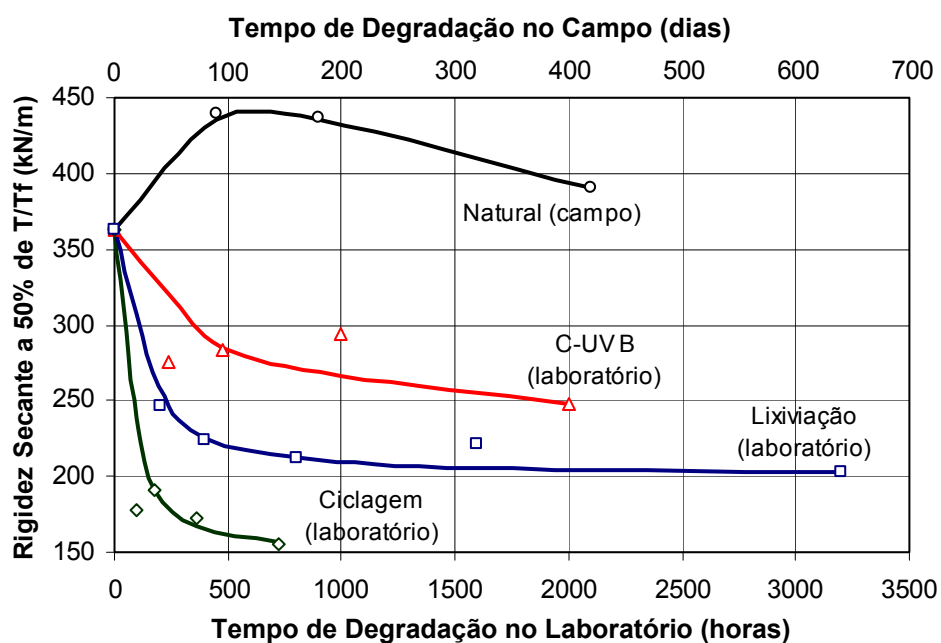


Figura 5.38 - Variação da rigidez secante a 50% de T/T_f com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.

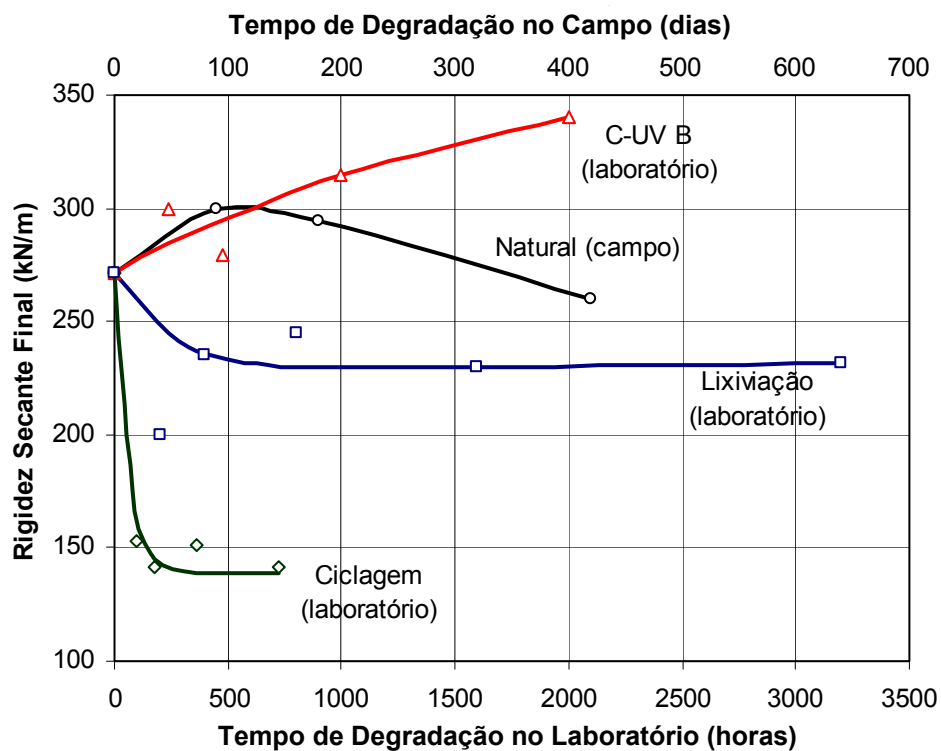


Figura 5.39 - Variação da rigidez secante final com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.

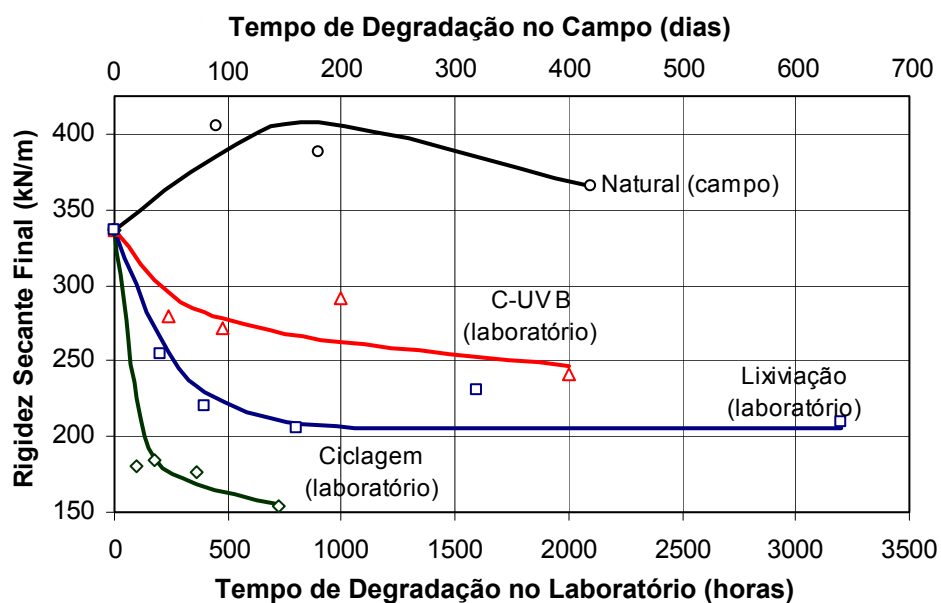


Figura 5.40 - Variação da rigidez secante final com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.

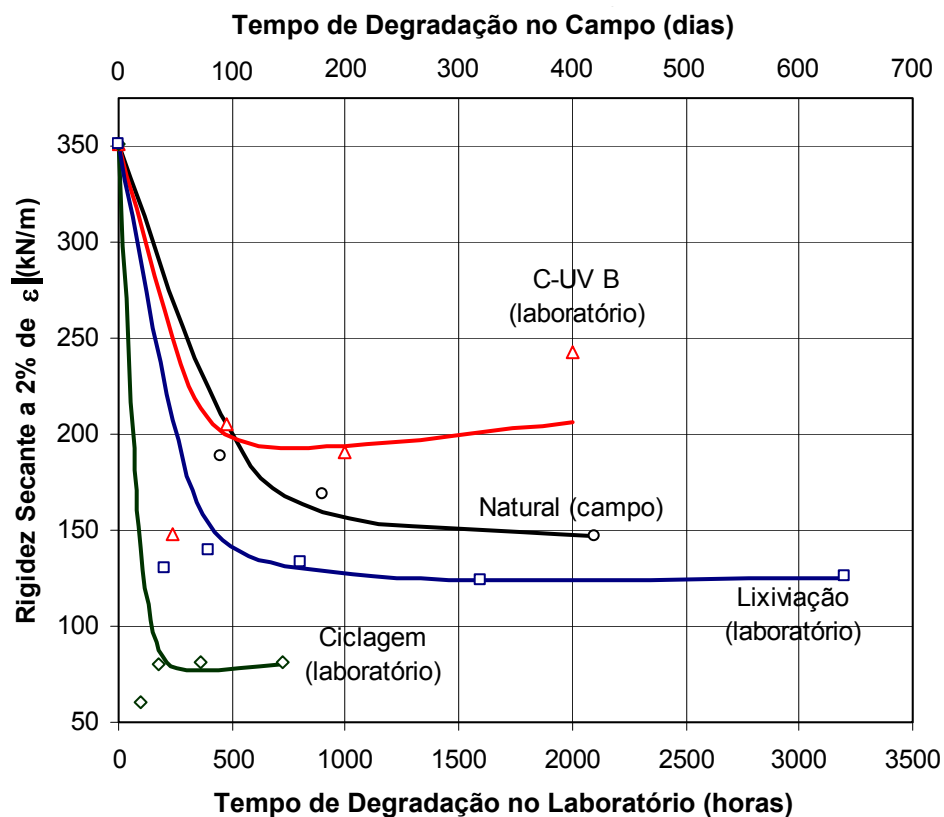


Figura 5.41 - Variação da rigidez secante a 2% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.

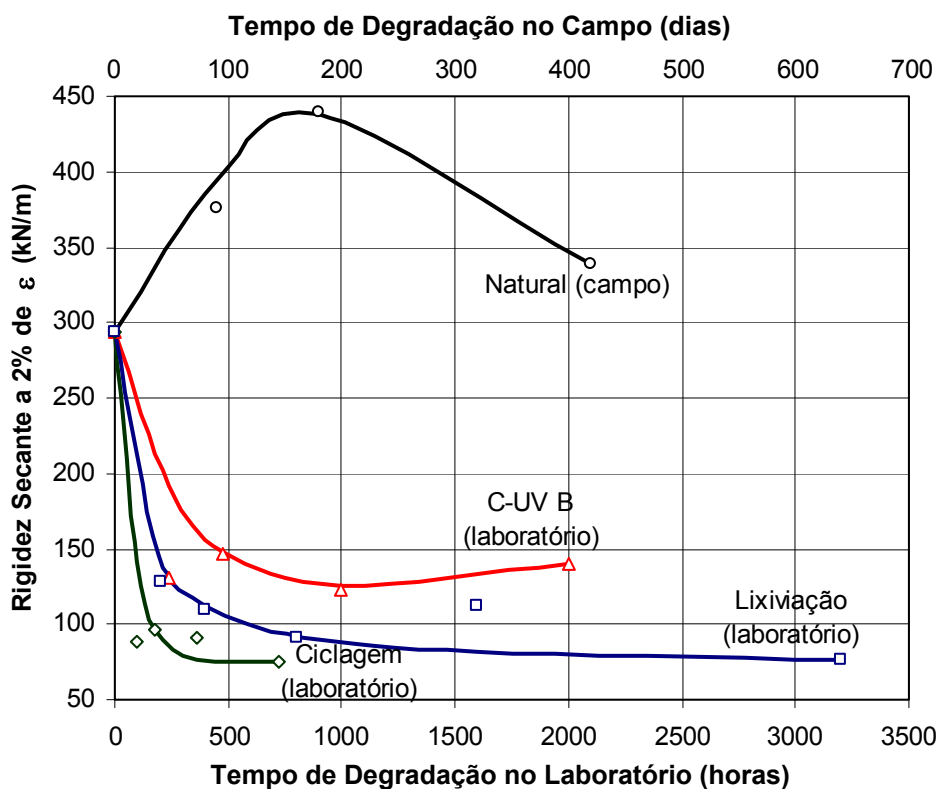


Figura 5.42 - Variação da rigidez secante a 2% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.

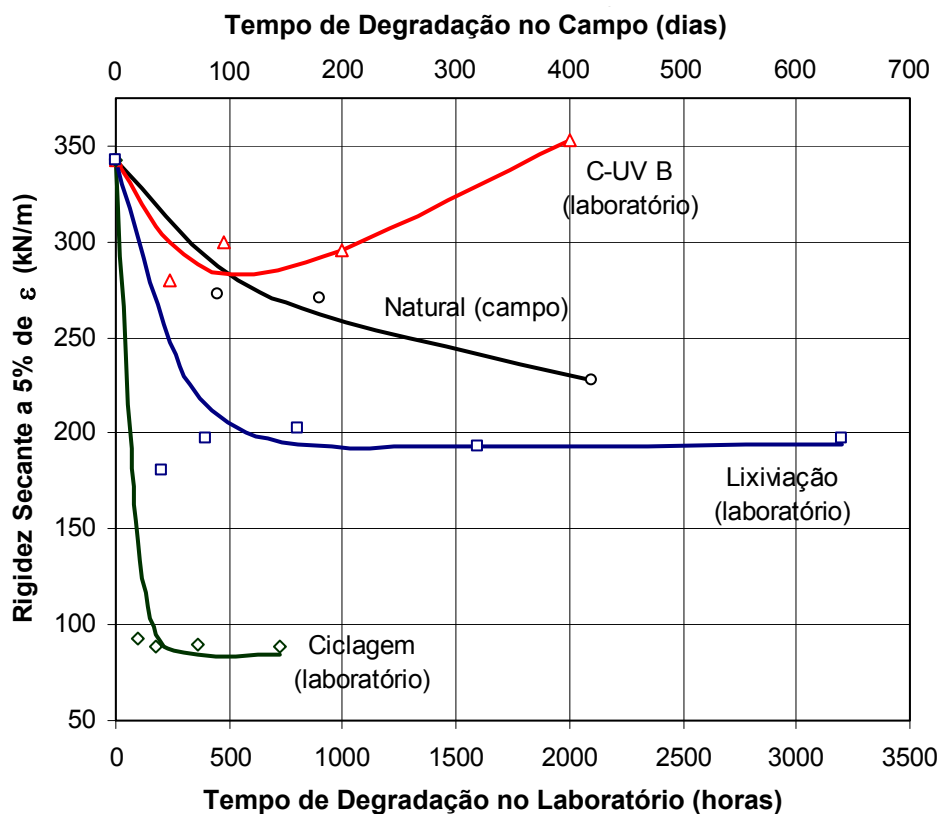


Figura 5.43 - Variação da rigidez secante a 5% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.

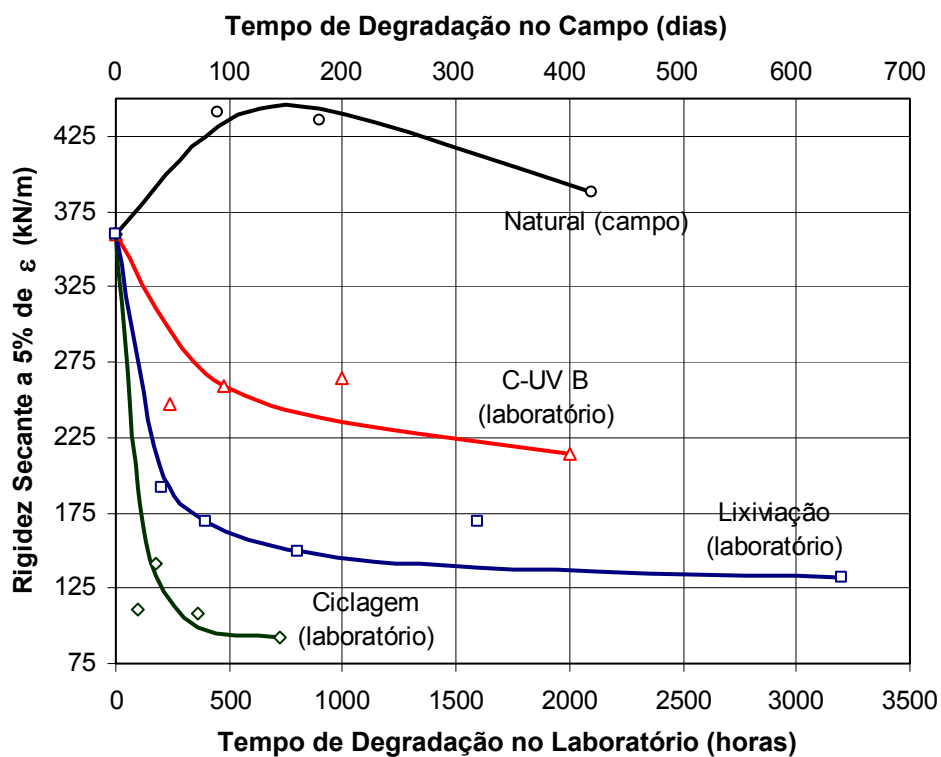


Figura 5.44 - Variação da rigidez secante a 5% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.

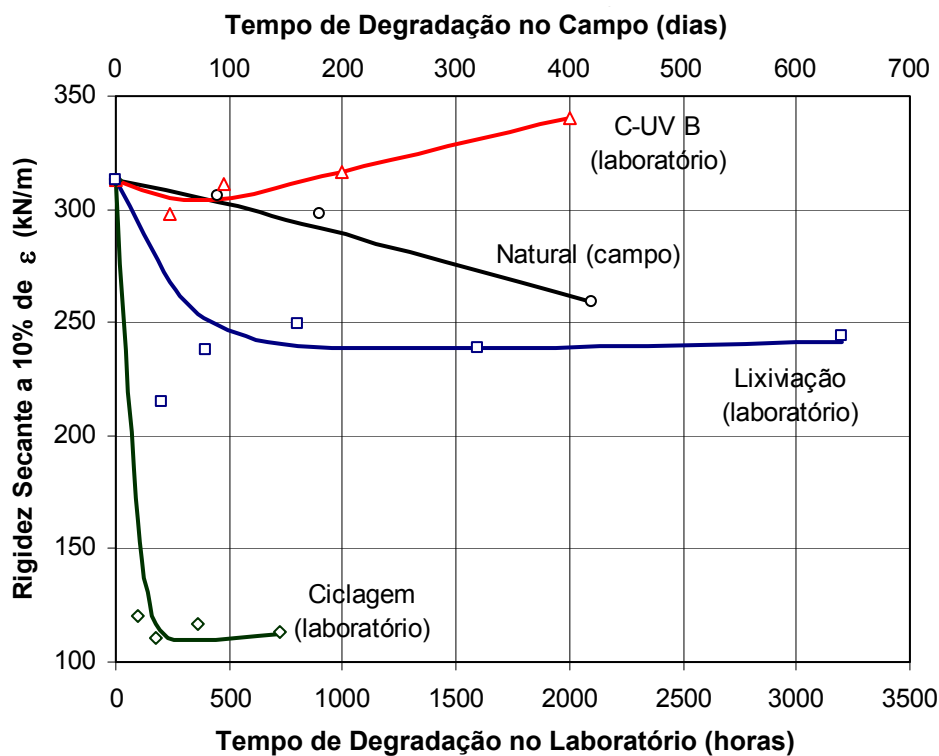


Figura 5.45 - Variação da rigidez secante a 10% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra A.

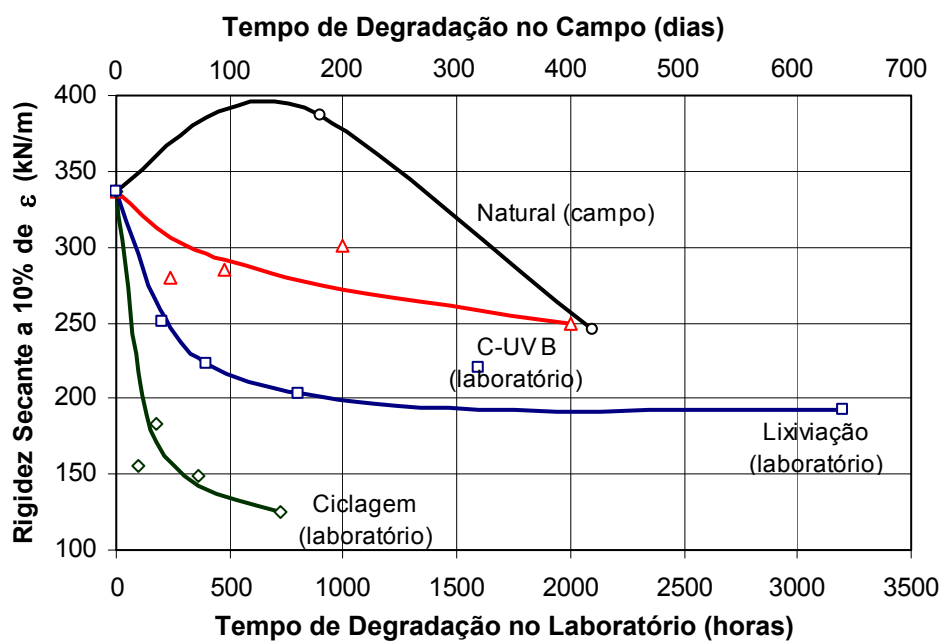


Figura 5.46 - Variação da rigidez secante a 10% de deformação com o tempo de degradação, no campo e no laboratório, para a Amostra B.

Constata-se das figuras 5.41, 5.43 e 5.45, que as rigidezes da Amostra A diminuem com a degradação natural. Em relação à degradação por ciclos de saturação e secagem, as rigidezes diminuem bruscamente até cerca de 200 horas e depois tendem à estabilização. Na degradação por lixiviação contínua, as rigidezes diminuem e tendem à estabilização com a degradação. As rigidezes da Amostra A, degradada por condensação e exposição à radiação ultravioleta, diminuem até um mínimo que ocorre em torno de 500 horas e voltam a crescer com o aumento da degradação.

Considerando que no campo existem condições adversas, como variação de temperatura, radiação ultravioleta, precipitação pluviométrica, umidade e vento, não se pode representar exatamente no laboratório tais condições. Deste modo, tem-se no laboratório uma aproximação dos efeitos da degradação natural.

Nota-se que a degradação por ciclos de saturação e secagem foi o procedimento que apresentou maiores efeitos de degradação, sendo o mais intenso.

A degradação por ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta foi a menos intensa. Ressalta-se que os efeitos da degradação ultravioleta podem ser amenizados pela incorporação de aditivos antioxidantes no material, exercendo também influência a quantidade dos mesmos. Devido a este fato, constata-se a diferença de comportamento entre as amostras A e B.

5.4 – RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO

Apresentam-se a seguir os resultados e as análises dos ensaios de resistência ao puncionamento estático realizados nos materiais de estudo. Faz-se, inicialmente, a apresentação dos resultados dos ensaios nos materiais intactos, degradados no campo e no laboratório e posteriormente discute-se detalhadamente a análise dos resultados obtidos. Os resultados dos ensaios de puncionamento estático são apresentados na forma de curvas força de puncionamento vs. penetração. A partir das curvas força de puncionamento vs. penetração obtidas para cada amostra, intacta e degradada, foi possível a determinação de curvas médias representativas do comportamento dos geotêxteis. A determinação das curvas médias para os resultados de resistência ao puncionamento seguiu o mesmo procedimento adotado para os resultados de resistência à tração.

As figuras 5.47 e 5.48 ilustram as curvas força de puncionamento vs. penetração resultantes dos ensaios de puncionamento estático para as amostras intactas, utilizadas para obtenção das curvas médias apresentadas na Figura 5.49. Destaca-se que estas curvas servem como referência para a avaliação da evolução da degradação dos materiais estudados.

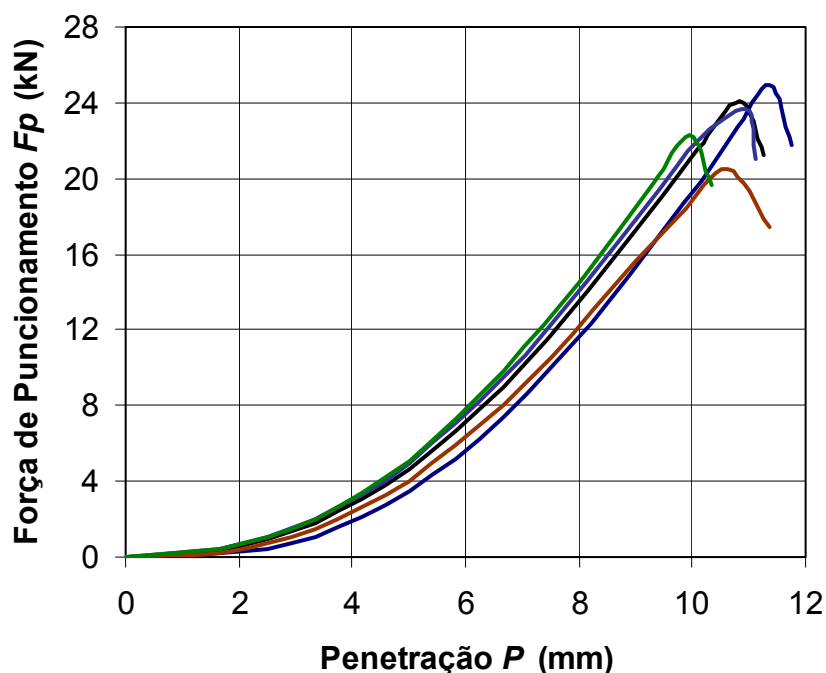


Figura 5.47 - Curvas força de puncionamento vs. penetração em ensaios de puncionamento estático da Amostra A, intacta.

As tabelas 5.5 e 5.6 apresentam a variação da força de puncionamento F_{p_f} , coeficiente de variação CV da força F_{p_f} e a penetração na ruptura P_f com os diferentes tipos e intensidades de degradação, obtidos a partir das curvas médias resultantes dos ensaios de resistência ao puncionamento para as amostras A e B, respectivamente. O coeficiente de variação CV foi definido anteriormente.

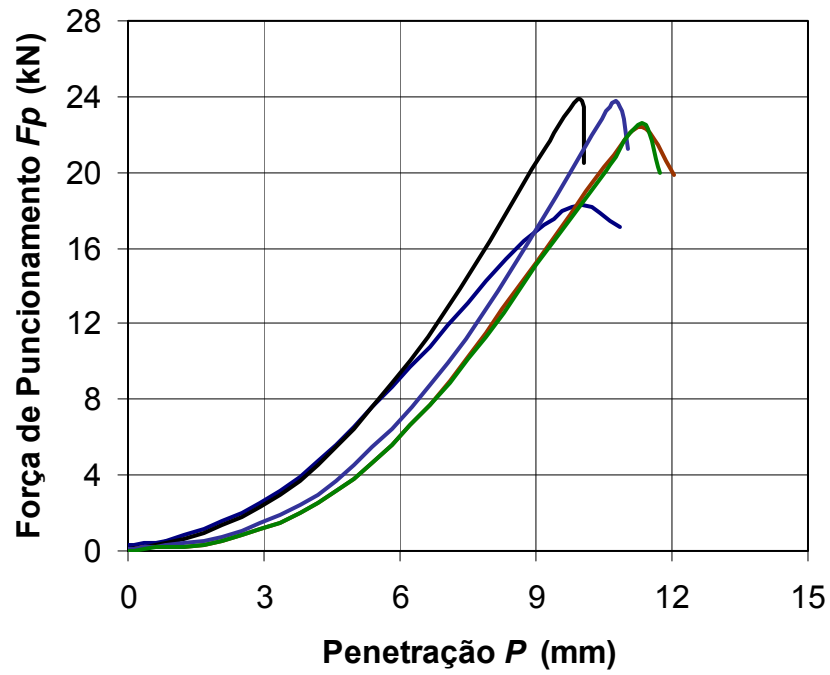


Figura 5.48 - Curvas força de puncionamento vs. penetração em ensaios de puncionamento estático da Amostra B, intacta.

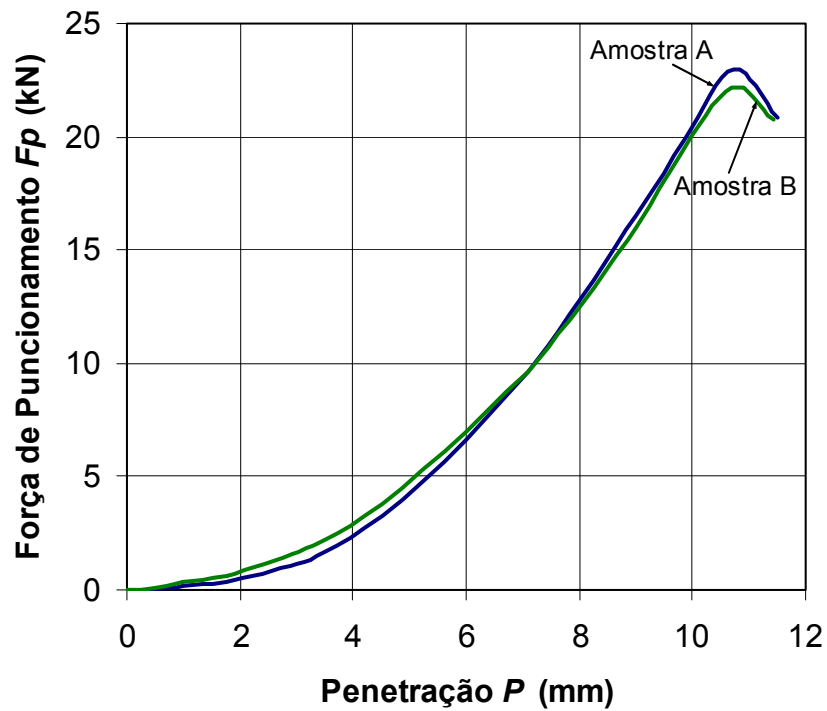


Figura 5.49 - Curvas força de puncionamento vs. penetração médias das amostras A e B, intactas.

Tabela 5.5 - Valores da força de puncionamento, coeficiente de variação e penetração na ruptura para a Amostra A.

Tipo e Intensidade de Degradação		F_{pf} (kN)	CV_{Fpf} (%)	P_f (mm)	CV_{Pf} (%)
<i>Intacto</i>		23,07±1,72	7,46	10,74±0,53	4,90
<i>Alterado naturalmente no campo</i>	90 dias	21,47±1,57	7,30	10,26±0,39	3,83
	180 dias	21,47±1,20	5,58	10,85±1,17	10,74
	420 dias	17,79±0,88	4,95	12,07±1,09	9,05
<i>Alterado por Saturação e Secagem</i>	100 horas	29,03±1,52	5,24	15,67±0,64	4,11
	180 horas	30,34±0,83	2,73	16,86±0,40	2,37
	360 horas	19,04±5,03	26,42	13,62±1,62	11,86
	720 horas	18,19±3,40	18,68	14,72±0,67	4,56
<i>Alterado por Lixiviação Contínua</i>	200 horas	22,41±1,88	8,38	12,83±0,58	4,50
	400 horas	21,11±1,81	8,58	12,49±0,68	5,43
	800 horas	22,88±0,40	1,77	13,31±0,04	0,30
	1600 horas	21,41±1,22	5,68	13,32±0,16	1,23
	3200 horas	21,87±1,93	8,80	13,33±0,68	5,11
<i>Alterado por Radiação Ultravioleta</i>	240 horas	23,30±0,88	3,78	10,70±0,54	5,05
	480 horas	22,49±0,83	3,68	11,21±0,71	6,31
	1000 horas	21,18±0,66	3,09	11,57±0,52	4,48
	2000 horas	21,21±1,24	5,84	11,49±0,61	5,29

Tabela 5.6 - Valores da força de puncionamento, coeficiente de variação e penetração na ruptura para a Amostra B.

Tipo e Intensidade de Degradação		F_{pf} (kN)	CV_{Fpf} (%)	P_f (mm)	CV_{Pf} (%)
<i>Intacto</i>		22,18±2,27	10,23	10,67±0,68	6,34
<i>Alterado naturalmente no campo</i>	90 dias	21,86±1,55	7,10	10,16±0,81	7,98
	180 dias	21,46±0,92	4,27	10,74±0,49	4,54
	420 dias	21,77±0,71	3,27	12,31±0,66	5,33
<i>Alterado por Saturação e Secagem</i>	100 horas	23,67±1,79	7,57	13,07±1,12	8,60
	180 horas	22,97±2,71	11,78	13,66±1,26	9,19
	360 horas	22,88±1,13	4,95	14,11±0,56	3,96
	720 horas	21,01±1,88	8,96	14,38±0,80	5,56
<i>Alterado por Lixiviação Contínua</i>	200 horas	13,98±1,82	12,99	11,45±0,70	6,07
	400 horas	12,09±0,78	6,45	10,31±1,10	10,71
	800 horas	13,63±1,03	7,59	10,39±1,04	9,98
	1600 horas	18,22±2,67	14,66	13,96±1,58	11,33
	3200 horas	16,60±1,66	9,98	14,17±1,17	8,26
<i>Alterado por Radiação Ultravioleta</i>	240 horas	22,31±1,09	4,91	9,68±0,54	5,56
	480 horas	22,33±0,41	1,86	9,95±0,05	0,47
	1000 horas	21,47±0,42	1,95	10,12±0,78	7,66
	2000 horas	20,04±0,50	2,48	8,95±0,45	5,03

5.4.1 – Dispersão e Representatividade dos Resultados

Os valores de CV apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6, indicam que a degradação no campo ou no laboratório não afeta sistematicamente a dispersão dos valores de força de puncionamento e penetração na ruptura. Isto indica que os resultados experimentais obtidos podem ser representativos do comportamento dos materiais frente aos processos de degradação no campo ou no laboratório. No entanto, nota-se que o eventual aumento dos valores do coeficiente CV para os materiais degradados no campo ou no laboratório em relação ao material intacto, indicam um aumento da heterogeneidade dos materiais devido a degradação. Isto pode indicar que a degradação ocorreu de forma não homogênea nos materiais estudados.

5.4.2 – Materiais Intactos

Observa-se que a Amostra B apresenta maior dispersão de resultados que a Amostra A (figuras 5.47 e 5.48). Isto também pode ser observado pelo coeficiente de variação CV (tabelas 5.5 e 5.6). Entretanto, as curvas médias das amostras são similares (Figura 5.49).

5.4.3 – Degradação Natural no Campo

As figuras 5.50 e 5.51 apresentam a variação da força de puncionamento vs. penetração obtida em dos ensaios de puncionamento estático para as amostras degradadas naturalmente no campo. Neste caso, a quantidade de aditivos antioxidantes não afeta significativamente o comportamento força de puncionamento vs. penetração devido à degradação natural dos geotêxteis, exceto para o último nível de degradação.

As figuras 5.52 e 5.53 representam a variação da força de puncionamento Fp_f e da penetração P_f na ruptura com o tempo de degradação natural para as amostras A e B. Nota-se a redução da força com o aumento do tempo de degradação para a Amostra A, enquanto que a Amostra B permanece praticamente estável. O aumento da penetração com a degradação para as amostras A e B indica que o estiramento das fibras dos materiais até a ruptura aumenta com o tempo de degradação.

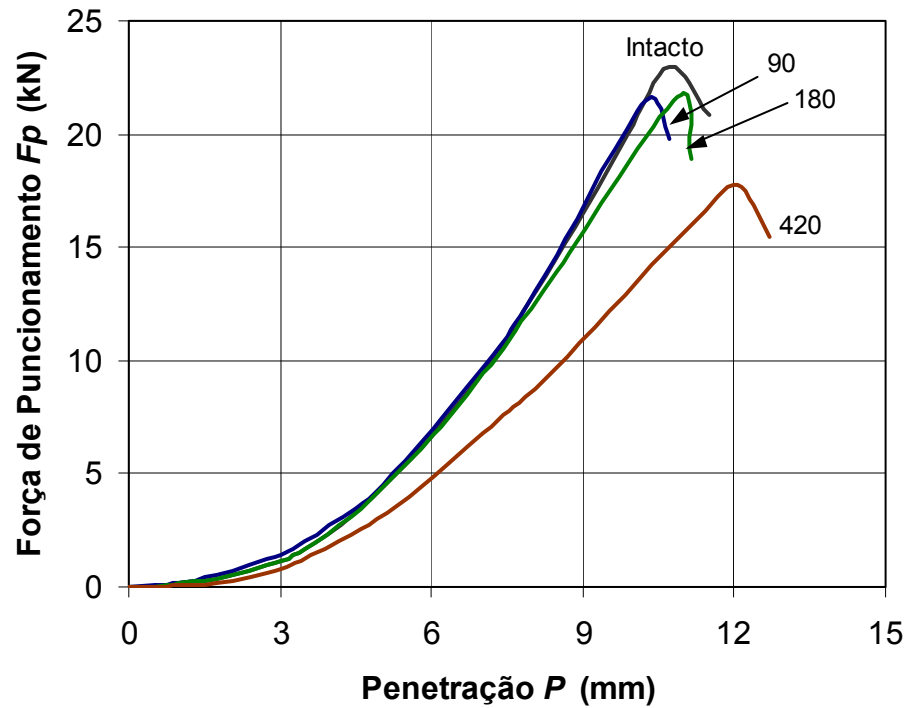


Figura 5.50 - Variação da força de puncionamento com a penetração do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra A.

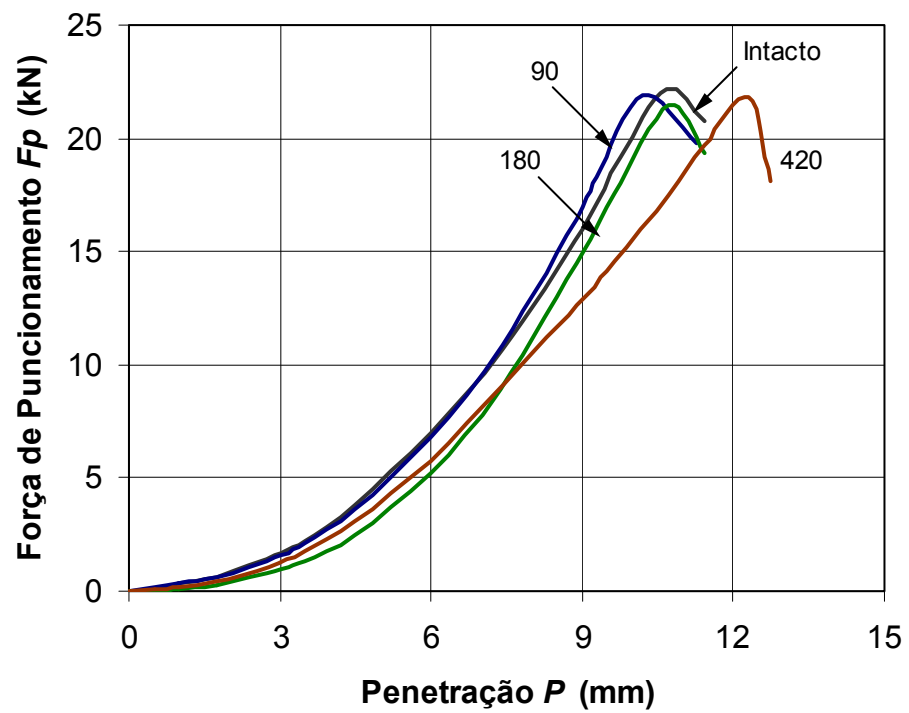


Figura 5.51 - Variação da força de puncionamento com a penetração do geotêxtil intacto e degradado naturalmente no campo, Amostra B.

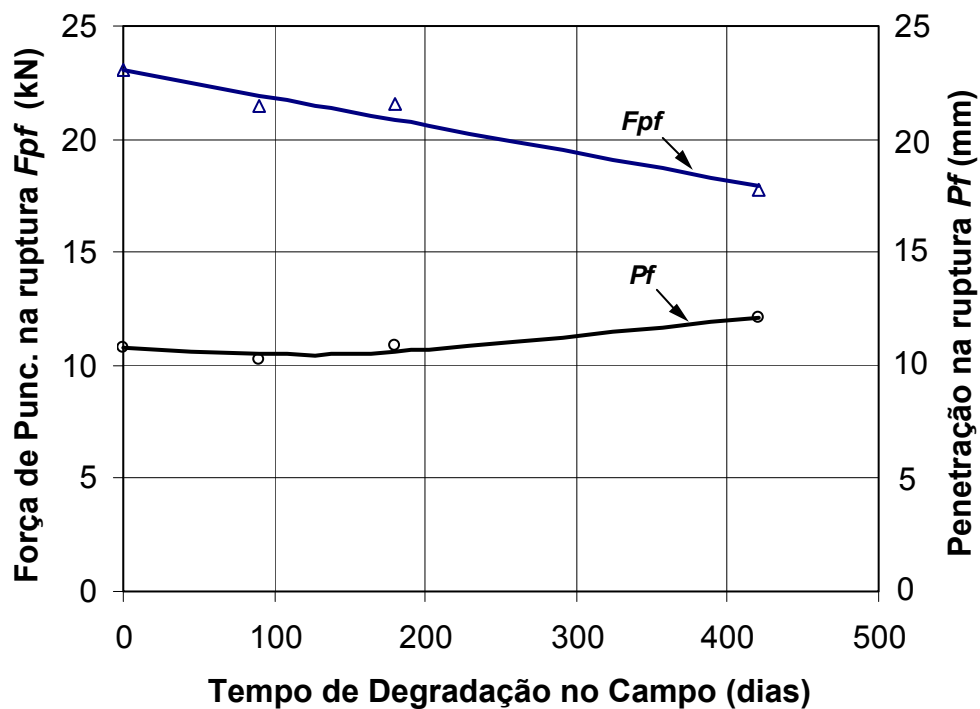


Figura 5.52 - Variação da força de punção e penetração na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra A.

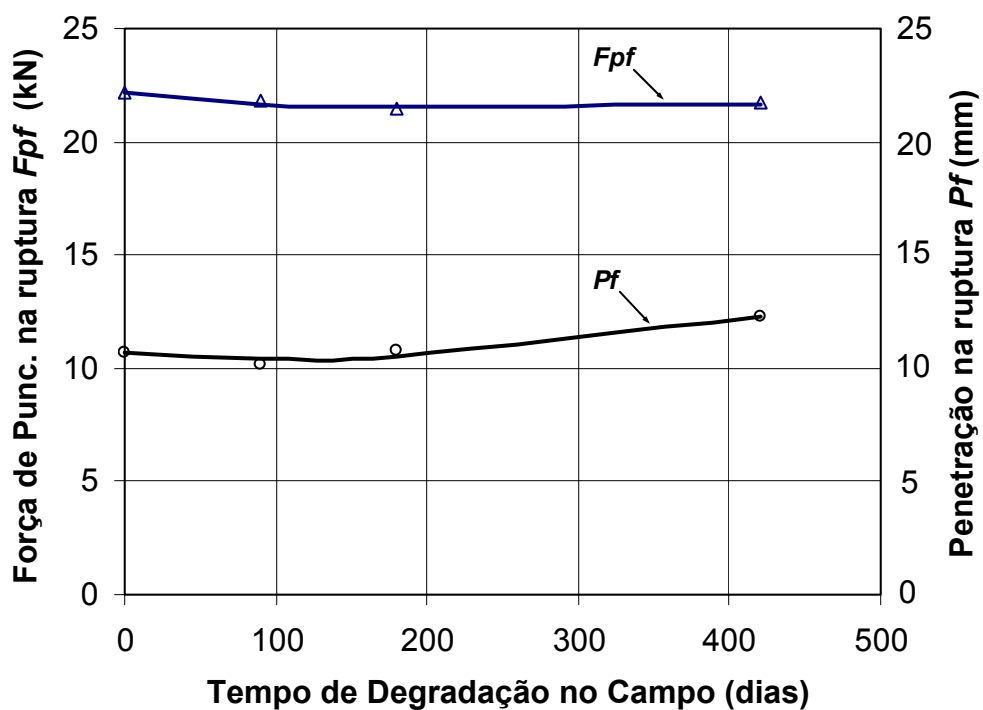
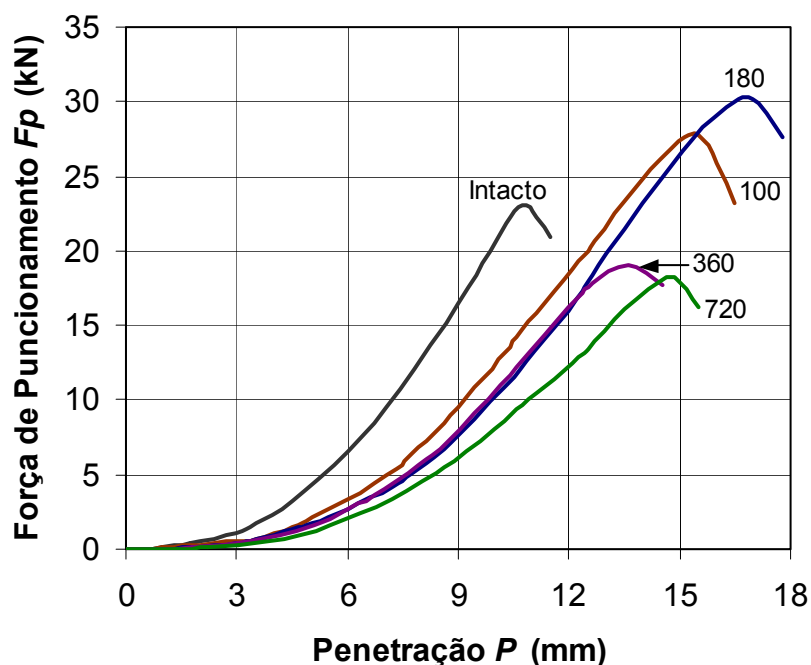


Figura 5.53 - Variação da força de punção e penetração na ruptura com o tempo de degradação natural no campo, para a Amostra B.

5.4.4 – Degradação Acelerada no Laboratório

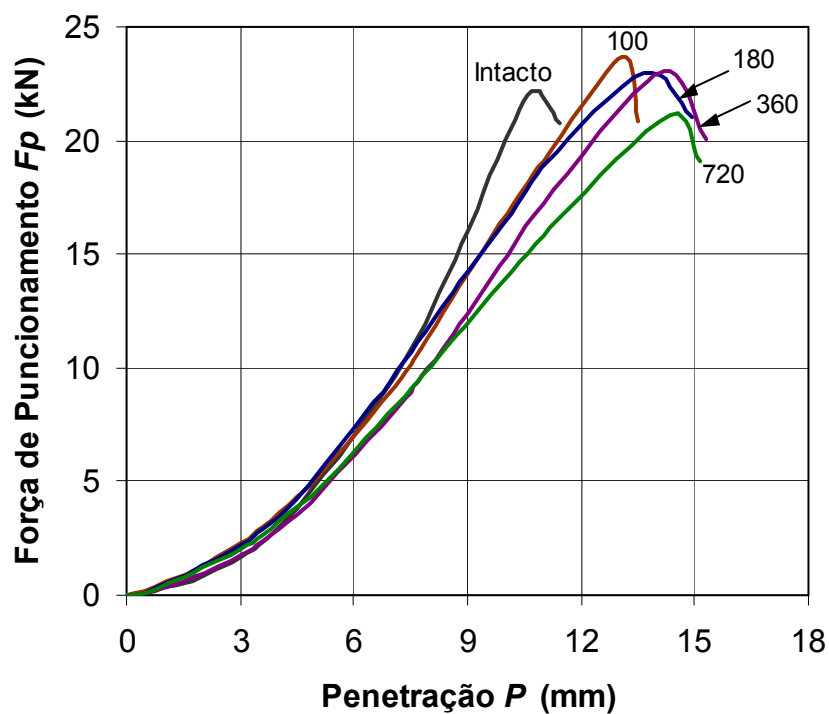
5.4.4.1 – Força de Puncionamento vs. Penetração

As figuras 5.54 a 5.59 apresentam a variação da força de puncionamento com a penetração obtida a partir dos resultados dos ensaios de resistência ao puncionamento estático para as amostras degradadas no laboratório por ciclos de saturação e secagem, condensação e exposição à radiação ultravioleta e lixiviação contínua, respectivamente.



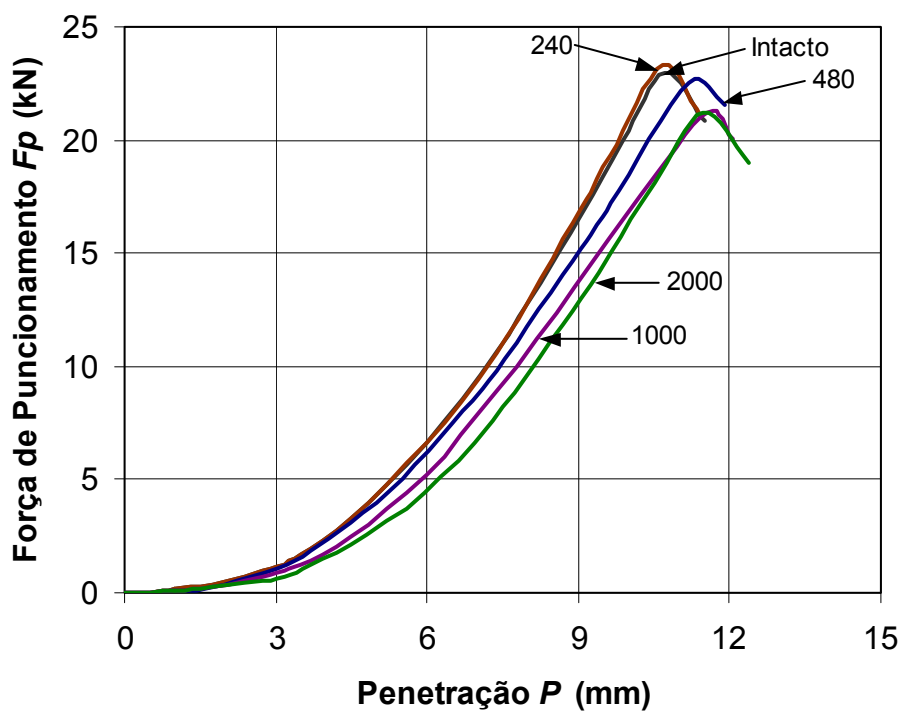
Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.54 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra A intacta e degradada por ciclos de saturação e secagem.



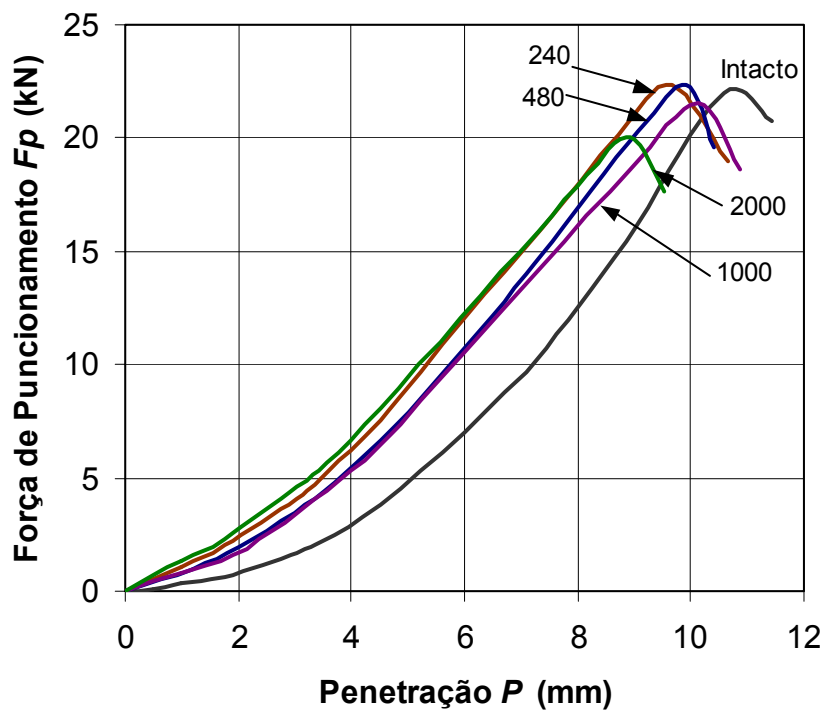
Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.55 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra B intacta e degradada por ciclos de saturação e secagem.



Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.56 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra A intacta e degradada por condensação e exposição à radiação ultravioleta.



Nota: tempo de degradação em ciclos.

Figura 5.57 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra B intacta e degradada por condensação e exposição à radiação ultravioleta.

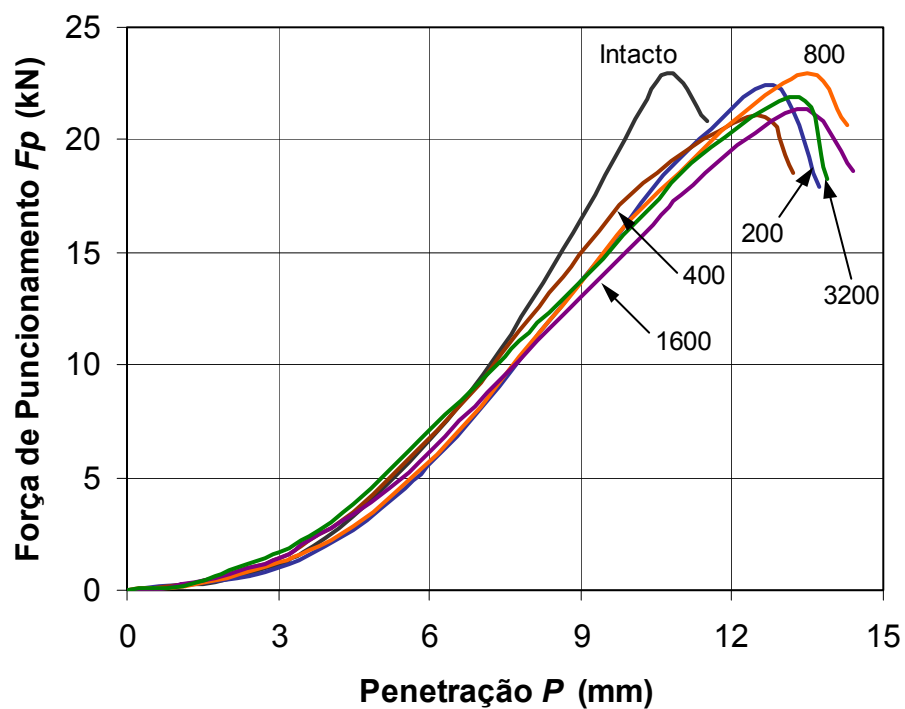


Figura 5.58 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra A intacta e degradada por lixiviação contínua.

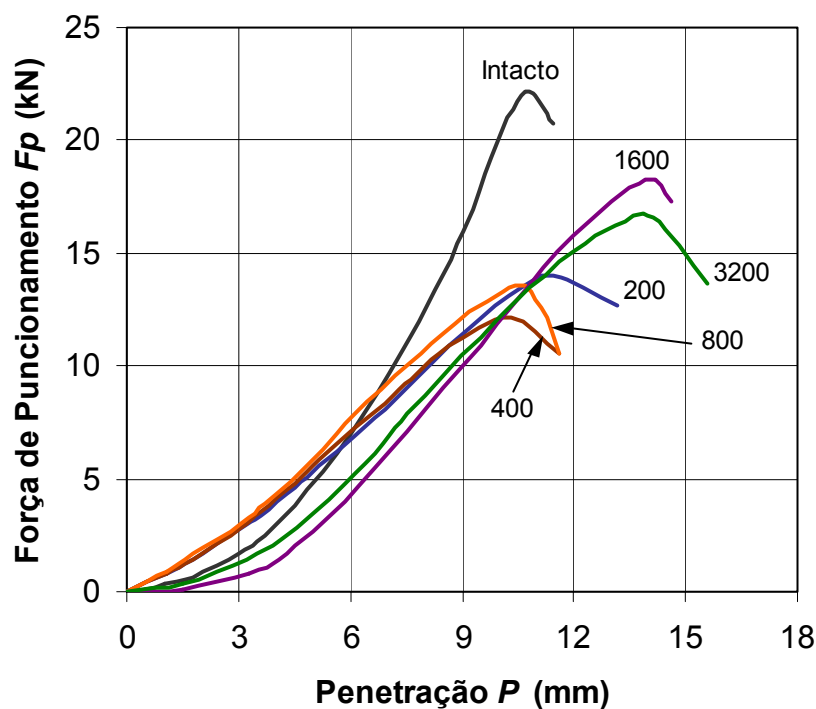


Figura 5.59 - Curvas médias da variação da força de puncionamento com a penetração para a Amostra B intacta e degradada por lixiviação contínua.

5.4.4.2 – Força de Puncionamento e Penetração na Ruptura

As figuras 5.60 a 5.65 representam graficamente as variações da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem, condensação e exposição à radiação ultravioleta e lixiviação contínua, respectivamente, para as amostras A e B. Genericamente, nota-se a redução da força de puncionamento e o aumento da penetração com o tempo de degradação, exceto para a Amostra B degradada por condensação e exposição à radiação ultravioleta (Figura 5.63). A curva de degradação por ciclos de saturação e secagem da Amostra A mostra o aumento inicial da força de puncionamento seguido de redução para elevados tempos de degradação. Entretanto, para a Amostra B, observa-se o aumento da penetração com a degradação.

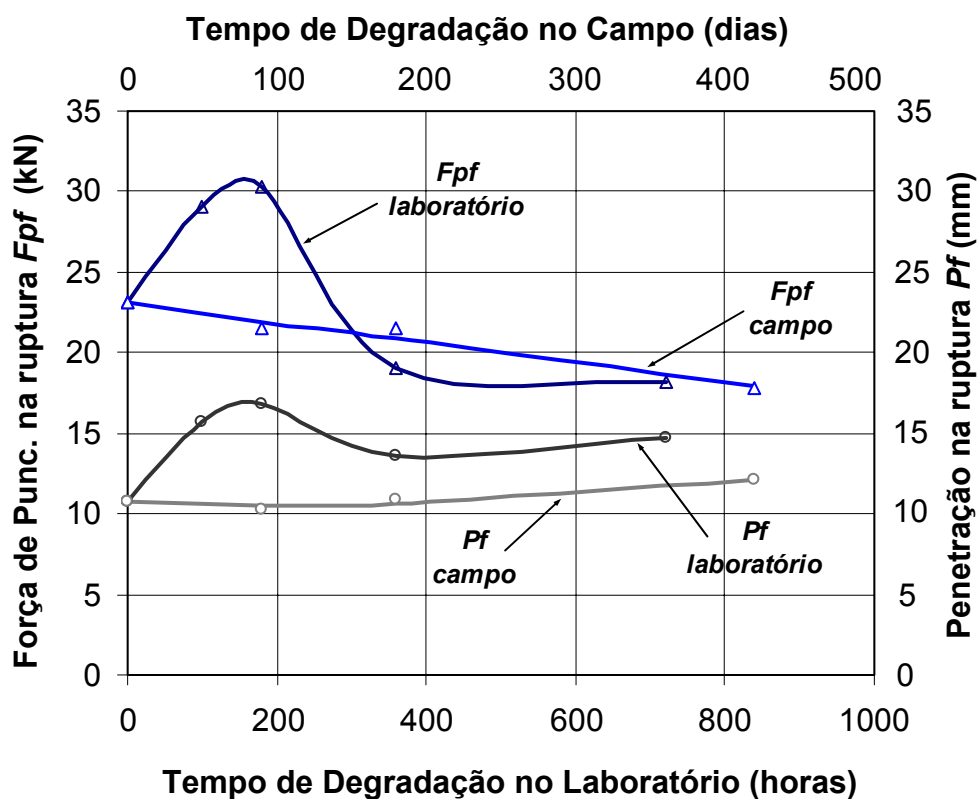


Figura 5.60 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem, para a Amostra A.

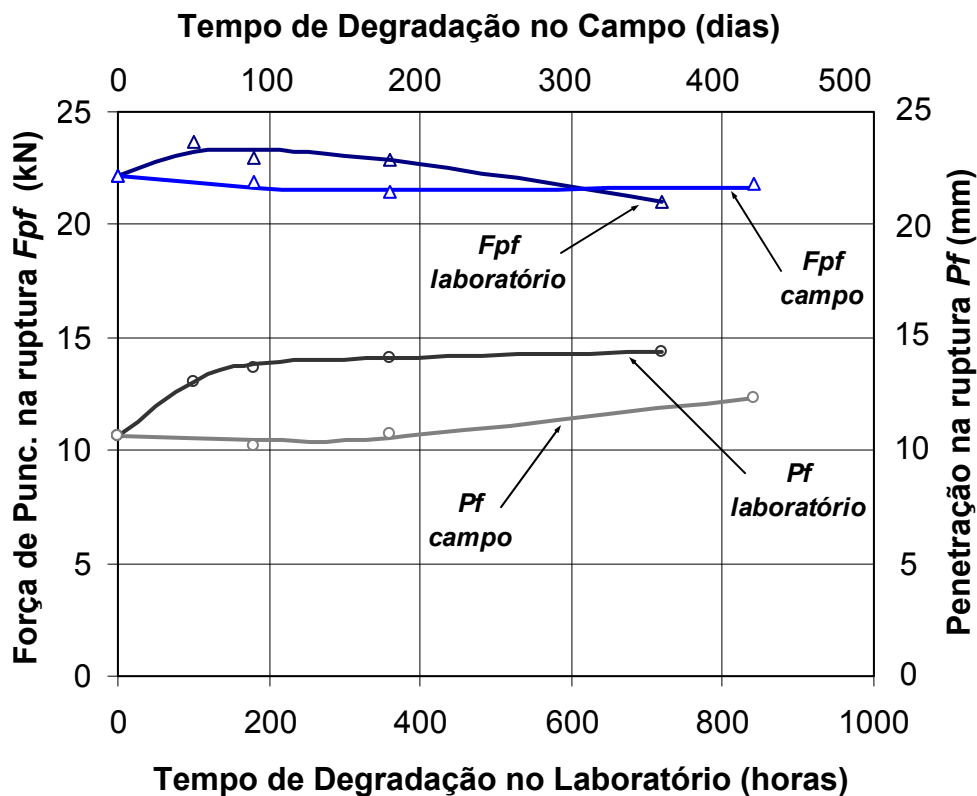


Figura 5.61 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação por ciclos de saturação e secagem, para a Amostra B.

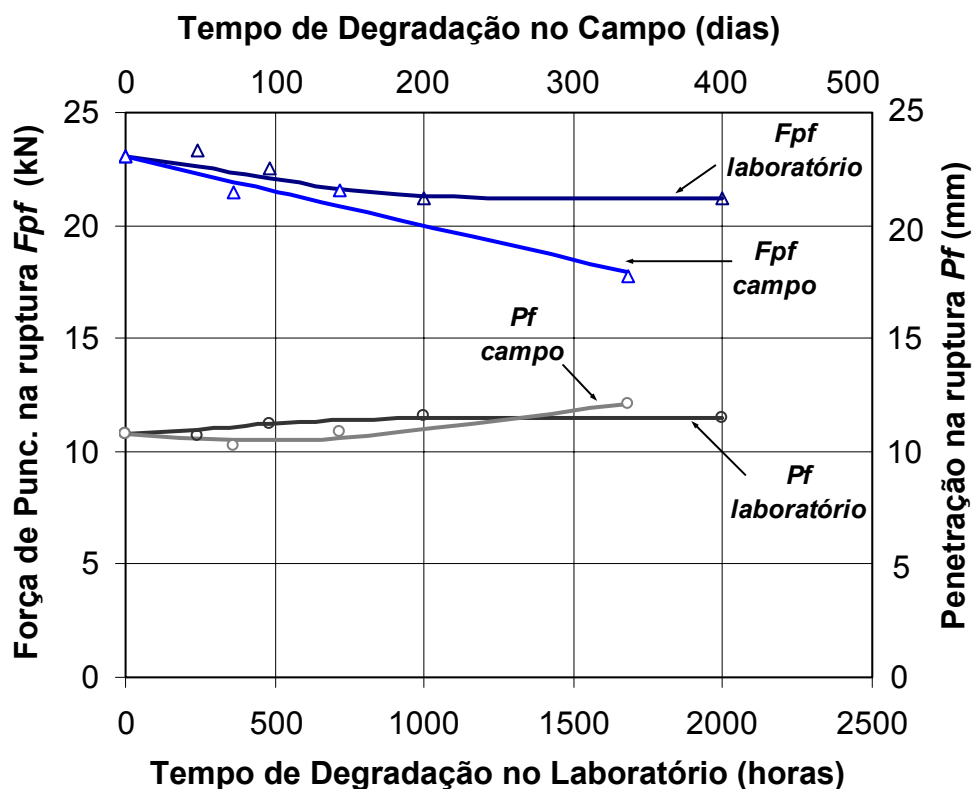


Figura 5.62 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação para a Amostra A degradada no equipamento C-UV B.

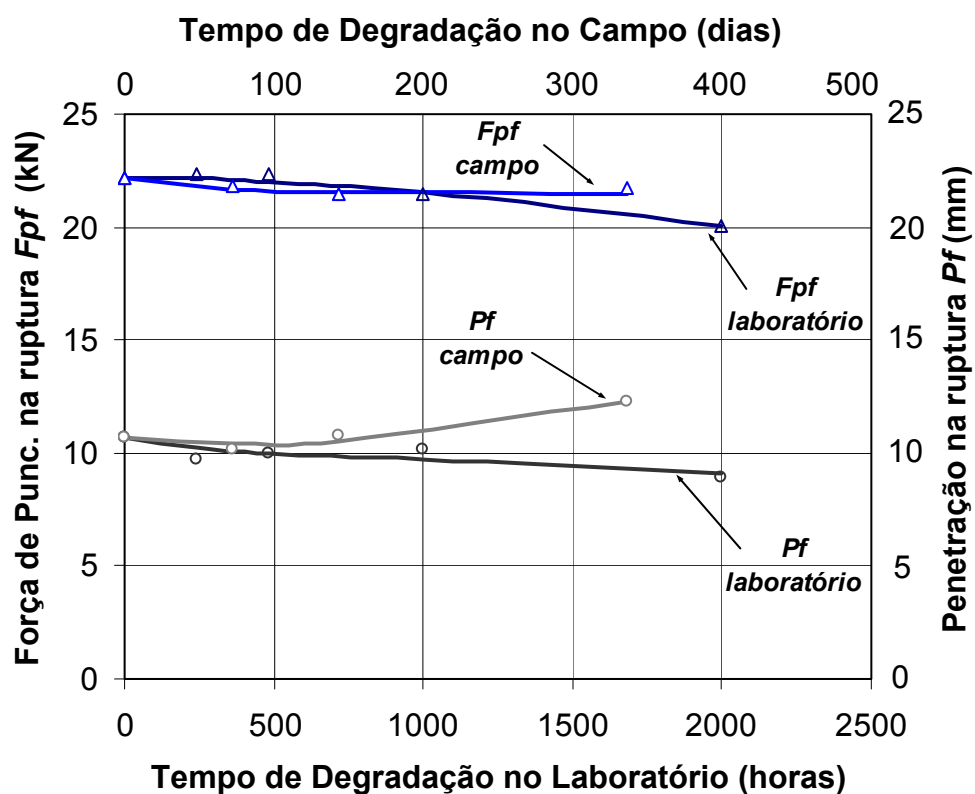


Figura 5.63 - Variação da força de puncionamento e penetração na ruptura com o tempo de degradação para a Amostra B degradada no equipamento C-UV B.

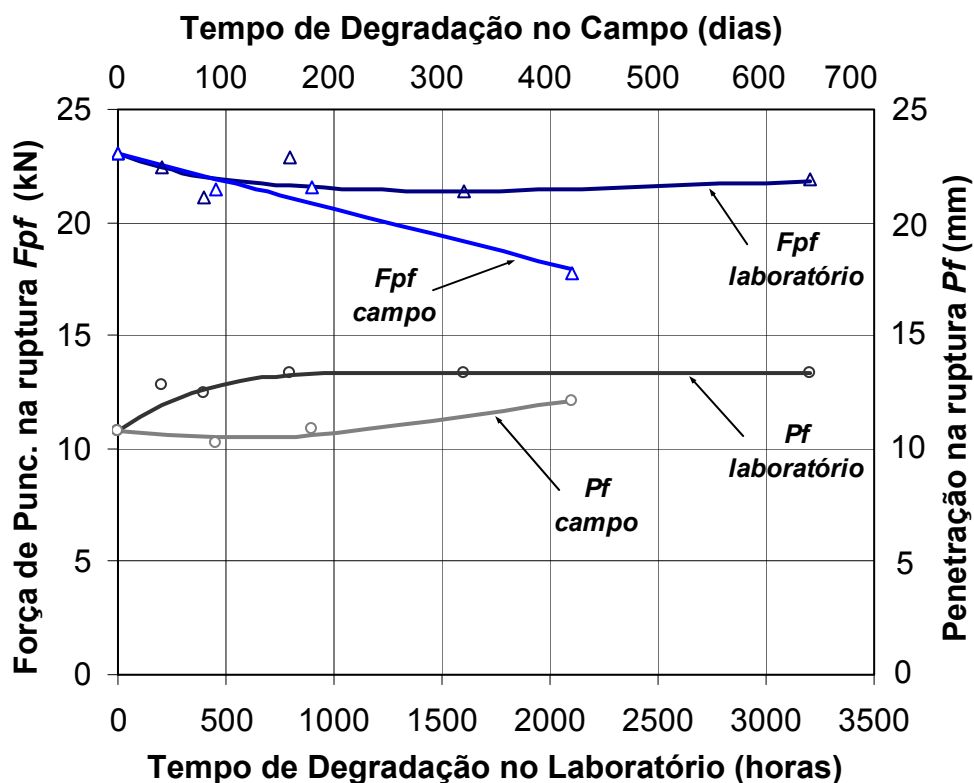


Figura 5.64 - Variação da força de punção e penetração na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet, para a Amostra A.

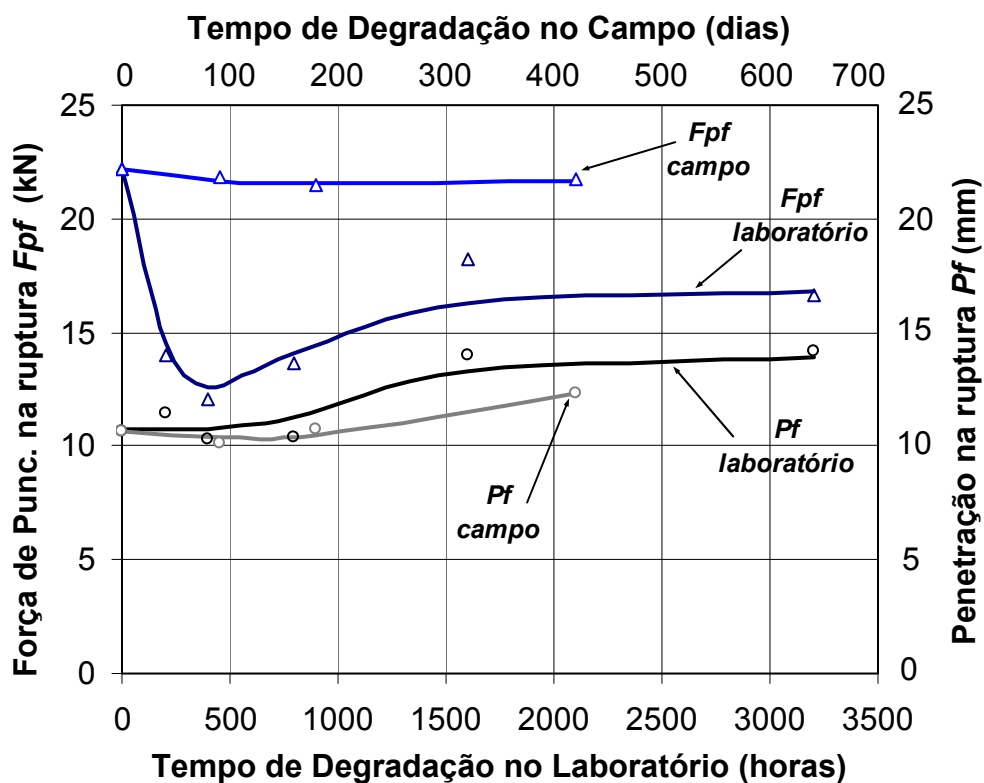


Figura 5.65 - Variação da força de punção e penetração na ruptura com o tempo de degradação por lixiviação contínua no equipamento Soxhlet, para a Amostra B.

Da Figura 5.62 observa-se que a força de puncionamento diminui com a degradação, tanto no campo quanto no laboratório, estabilizando para a degradação no laboratório. Para a Amostra B (Figura 5.63) observa-se o mesmo comportamento, mas, no entanto, é a degradação no campo que tende à estabilidade.

A variação da força e penetração na ruptura dos geotêxteis degradados por lixiviação contínua (figuras 5.64 e 5.65) não apresentaram comportamento monotônico com a degradação.

Observando as figuras 5.60 a 5.65, constata-se que o melhor procedimento de degradação para análise das propriedades mecânicas obtidas dos ensaios de resistência ao puncionamento e comparação com o procedimento de degradação natural é a exposição à radiação ultravioleta.

Capítulo 6 - PREVISÃO DE COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO

6.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo, determinam-se as correlações entre os tempos de degradação no campo e no laboratório para as diferentes propriedades mecânicas dos materiais e diferentes procedimentos de degradação acelerada no laboratório. Estas correlações foram feitas a partir de índices de degradação calculados para cada propriedade do material em cada nível e tipo de degradação. As propriedades consideradas são a carga de tração e a deformação na ruptura, a rigidez à tração, a força de punção e a penetração máxima no punção estático. Posteriormente, apresenta-se a metodologia para a determinação de comportamento dos materiais estudados.

6.2 – RELAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE DEGRADAÇÃO NO CAMPO E NO LABORATÓRIO

6.2.1 Índices de degradação

Para a correlação entre os tempos de degradação no campo e no laboratório são utilizados índices de degradação que fazem uma comparação entre uma determinada característica do material no estado inicial de utilização (intacto) e a mesma característica no estado alterado. Desta forma, estabelece-se uma equação geral que representa o índice de degradação do material I , expressa da seguinte forma:

$$I = \frac{|x - x_0|}{y} \times 100 \% \quad \text{Equação 6.1}$$

onde x_0 e x são as características do material no estado intacto e alterado, respectivamente. A variável y assume o valor x_0 ou x quando a característica

analisada diminui ou aumenta, respectivamente, devido à degradação do material. Assim, o valor I varia de zero, para o material intacto, até um valor máximo, sempre menor que 100%, para o material mais alterado (Maia, 2001).

A partir das propriedades consideradas, definem-se os seguintes índices: índice de degradação da carga de tração na ruptura I_{Tf} ; índice de degradação da deformação de tração na ruptura $I_{\varepsilon f}$; índice de degradação da rigidez à tração I_J ; índice de degradação da força de puncionamento na ruptura I_{Fpf} ; índice de degradação da penetração ao puncionamento na ruptura I_{Pf} , definidos pelas equações 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6, respectivamente.

$$I_{Tf} = \frac{|T_f - T_{f_0}|}{T_f} \times 100 \% \quad \text{Equação 6.2}$$

$$I_{\varepsilon f} = \frac{|\varepsilon_f - \varepsilon_{f_0}|}{\varepsilon_{f_0}} \times 100 \% \quad \text{Equação 6.3}$$

$$I_J = \frac{|J - J_0|}{J_0} \times 100 \% \quad \text{Equação 6.4}$$

$$I_{Fpf} = \frac{|Fp_f - Fp_{f_0}|}{Fp_f} \times 100 \% \quad \text{Equação 6.5}$$

$$I_{Pf} = \frac{|P_f - P_{f_0}|}{P_{f_0}} \times 100 \% \quad \text{Equação 6.6}$$

As tabelas 6.1 e 6.2 ilustram a variação dos índices de degradação calculados para as amostras submetidas a ensaios de tração não-confinada. As tabelas 6.3 e 6.4 ilustram a variação dos índices de degradação calculados para as amostras submetidas a ensaios de puncionamento estático.

Tabela 6.1 - Variação dos índices de degradação para a Amostra A, resistência à tração.

Tipo e tempo de degradação		Índice em % na		Índice em % no final de T/T_f	Índice em % a 50% de T/T_f		Índice em % nas deformações iguais a		
		IT_f	IE_f	$IJsec_f$	$IJtg$	$IJsec$	$I2\%$	$I5\%$	$I10\%$
<i>Intacto</i>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Natural (dias)</i>	90	3,04	4,31	9,58	12,14	9,23	46,29	20,38	2,23
	180	6,96	16,33	7,74	11,21	11,78	52,04	21,03	4,75
	420	18,61	15,85	4,15	2,72	24,64	58,15	33,49	17,22
<i>Saturação e Secagem (horas)</i>	100	17,59	50,04	43,50	41,66	55,86	82,70	72,79	61,46
	180	11,27	51,41	47,87	44,49	59,19	77,07	74,17	64,70
	360	17,14	28,49	44,34	39,11	59,42	76,85	73,78	62,70
	720	27,59	24,62	47,99	42,55	61,95	76,78	74,13	63,89
<i>Lixiviação (horas)</i>	200	9,57	23,89	26,33	21,65	34,55	63,02	47,33	31,36
	400	15,31	27,41	13,36	11,62	27,75	60,18	42,22	24,09
	800	4,38	26,27	9,68	5,28	25,45	61,96	40,88	20,39
	1600	11,43	22,92	15,21	11,75	27,73	64,69	43,72	23,68
	3200	6,91	16,07	14,73	6,65	26,46	64,21	42,28	21,96
<i>Ultravioleta (horas)</i>	240	3,23	0,63	9,58	6,14	10,13	57,74	18,19	4,82
	480	4,92	0,48	2,93	8,66	5,61	41,51	12,36	0,49
	1000	1,23	8,24	13,89	12,86	5,11	45,66	13,55	1,01
	2000	13,73	30,21	20,22	21,24	6,32	30,93	2,90	7,88

Tabela 6.2 - Variação dos índices de degradação para a Amostra B, resistência à tração.

Tipo e tempo de degradação		Índice em % na		Índice em % no final de T/T_f	Índice em % a 50% de T/T_f		Índice em % nas deformações iguais a		
		IT_f	IE_f	$IJsec_f$	$IJtg$	$IJsec$	$I2\%$	$I5\%$	$I10\%$
<i>Intacto</i>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Natural (dias)</i>	90	3,34	16,16	17,20	9,61	17,45	21,95	18,22	17,08
	180	7,56	21,62	13,27	3,61	16,93	33,05	17,43	13,14
	420	12,44	19,18	7,95	1,89	7,03	13,29	7,15	26,93
<i>Saturação e Secagem (horas)</i>	100	11,08	50,77	46,43	42,82	51,08	69,70	69,20	53,92
	180	2,20	43,78	45,07	44,07	47,23	67,24	60,87	45,64
	360	13,31	52,73	47,42	44,75	52,31	69,11	69,79	55,60
	720	15,91	58,97	54,17	49,43	57,21	74,48	74,46	62,78
<i>Lixiviação (horas)</i>	200	1,73	21,30	24,11	20,90	32,18	56,57	46,70	25,35
	400	1,99	31,83	34,39	31,54	38,15	62,68	53,11	33,75
	800	9,30	38,79	38,85	34,66	41,66	68,99	58,64	39,72
	1600	5,59	34,55	31,55	30,63	38,95	61,58	53,01	34,45
	3200	5,10	37,41	37,80	35,69	44,22	73,81	63,49	42,80
<i>Ultravioleta (horas)</i>	240	1,77	13,96	16,67	20,65	24,11	55,40	31,15	16,82
	480	3,02	17,34	19,26	20,89	21,71	50,14	27,85	15,10
	1000	4,32	18,50	13,41	12,56	19,01	58,40	26,35	10,50
	2000	4,32	20,34	28,27	27,20	31,84	52,18	40,46	25,73

Tabela 6.3 - Força de puncionamento, coeficiente de variação, penetração e índices na ruptura para a Amostra A submetida a ensaios de puncionamento estático.

Tipo e Tempo de Degradação		$IF_{pf}(\%)$	$IP_f(\%)$
<i>Intacto</i>		0	0
<i>Alterado naturalmente no campo (dias)</i>	90	7,45	4,68
	180	6,95	1,02
	420	29,68	12,38
<i>Alterado por Saturação e Secagem (horas)</i>	100	25,83	45,90
	180	31,51	56,98
	360	21,17	26,82
	720	26,83	37,06
<i>Alterado por Lixiviação Contínua (horas)</i>	200	2,95	19,46
	400	9,28	16,29
	800	0,83	23,93
	1600	7,75	24,02
	3200	5,49	24,12
<i>Alterado por Radiação Ultravioleta (horas)</i>	240	1,00	0,37
	480	2,58	4,38
	1000	8,92	7,73
	2000	8,77	6,98

Tabela 6.4 - Força de puncionamento, coeficiente de variação, penetração e índices na ruptura para a Amostra B submetida a ensaios de puncionamento estático.

Tipo e Tempo de Degradação		$IF_{pf}(\%)$	$IP_f(\%)$
<i>Intacto</i>		0	0
<i>Alterado naturalmente no campo (dias)</i>	90	1,46	5,02
	180	3,36	0,66
	420	1,88	15,37
<i>Alterado por Saturação e Secagem (horas)</i>	100	6,72	22,49
	180	3,56	28,02
	360	3,16	32,24
	720	5,57	34,77
<i>Alterado por Lixiviação Contínua (horas)</i>	200	58,66	7,31
	400	83,46	3,49
	800	62,73	2,69
	1600	21,73	30,83
	3200	33,61	32,52
<i>Alterado por Radiação Ultravioleta (horas)</i>	240	0,59	10,23
	780	0,68	7,24
	1000	3,31	5,43
	2000	10,68	19,22

As figuras 6.1 a 6.20 ilustram graficamente as variações dos índices de degradação com os tempos de degradação no campo ou no laboratório. Nestas figuras são apresentados os valores experimentais e curvas ajustadas. A determinação das curvas ajustadas procurou definir uma tendência de variação monotônica. No entanto, a forte tendência não monotônica, normalmente verificada nos resultados, dificulta a determinação da curva de ajuste.

Considerando que a representatividade dos processos de degradação está relacionada à similaridade da variação dos índices de degradação no campo e no laboratório, além da proximidade entre os índices máximos, pode-se concluir dos resultados apresentados na figuras 6.1 a 6.20 que os procedimentos de degradação no laboratório não simulam plenamente as condições de campo. No entanto, numa análise geral dos dados pode-se constatar que a degradação por ciclos de saturação e secagem são os menos representativos da condição de campo. Isto se justifica pela elevada intensidade de degradação gerada neste procedimento mesmo para baixos tempos de degradação. Além disto, os procedimentos de degradação por ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta e por lixiviação contínua são satisfatórios em cerca de 70% dos parâmetros analisados.

Avaliando individualmente os resultados de cada amostra estudada, verifica-se que os procedimentos de degradação por ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta e por lixiviação contínua são mais representativos na Amostra A. Isto se justifica, possivelmente pela maior taxa de aditivo antioxidante da Amostra A.

Dos resultados apresentados pode-se concluir que nem todos os índices de degradação mostram variação significativa que permita uma comparação adequada entre os efeitos da degradação natural no campo com os efeitos da degradação no laboratório. Deste modo, qualquer análise buscando a previsão de comportamento a longo prazo deve buscar cuidadosamente qual índice de degradação que possui variação representativa da condição de campo para o parâmetro que se deseja avaliar.

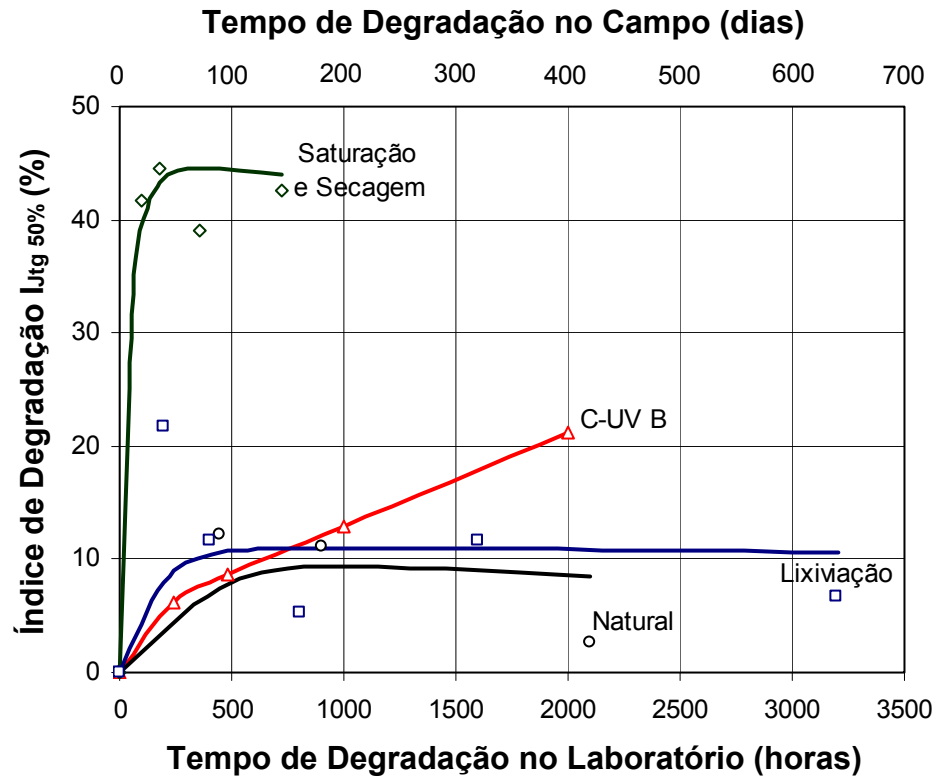


Figura 6.1 - Variação dos índices de degradação da rigidez tangente a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra A.

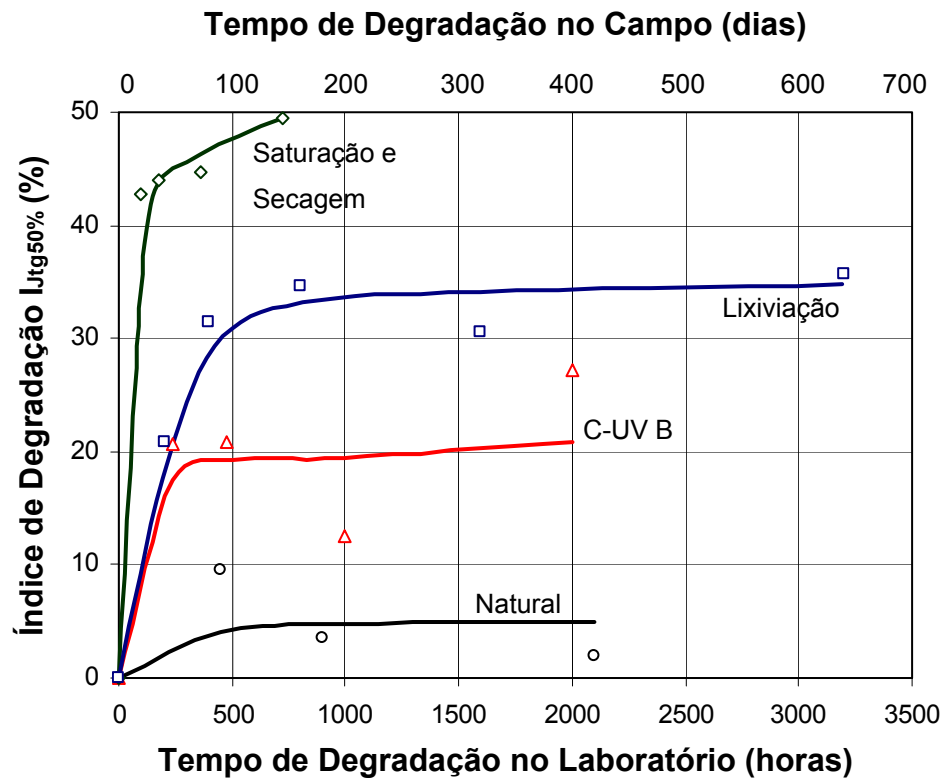


Figura 6.2 - Variação dos índices de degradação da rigidez tangente a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra B.

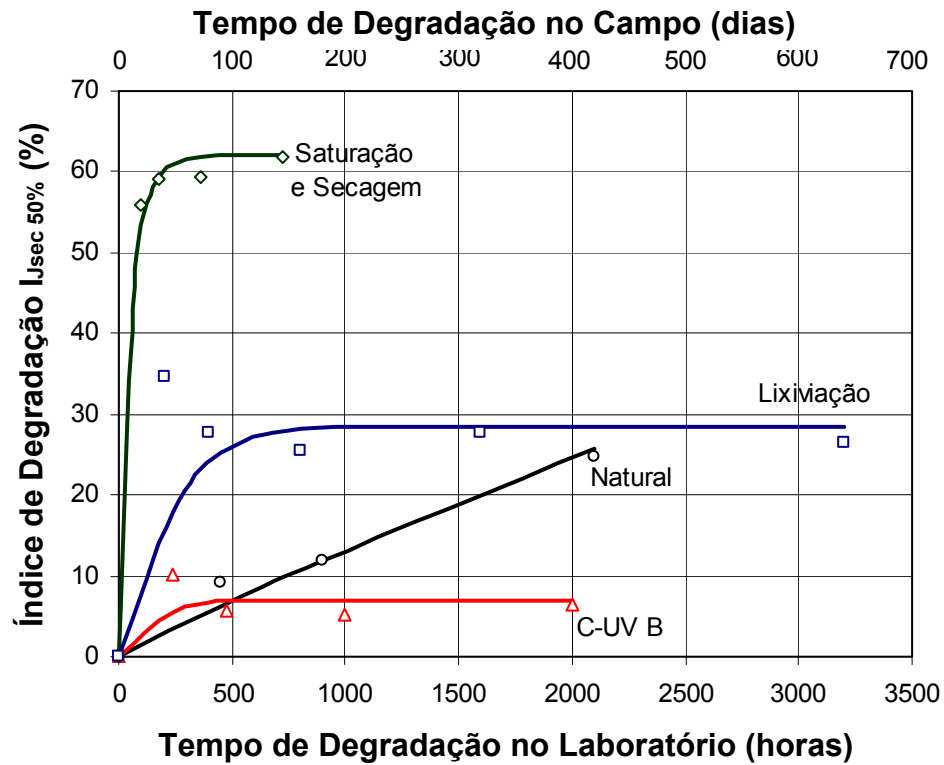


Figura 6.3 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra A.

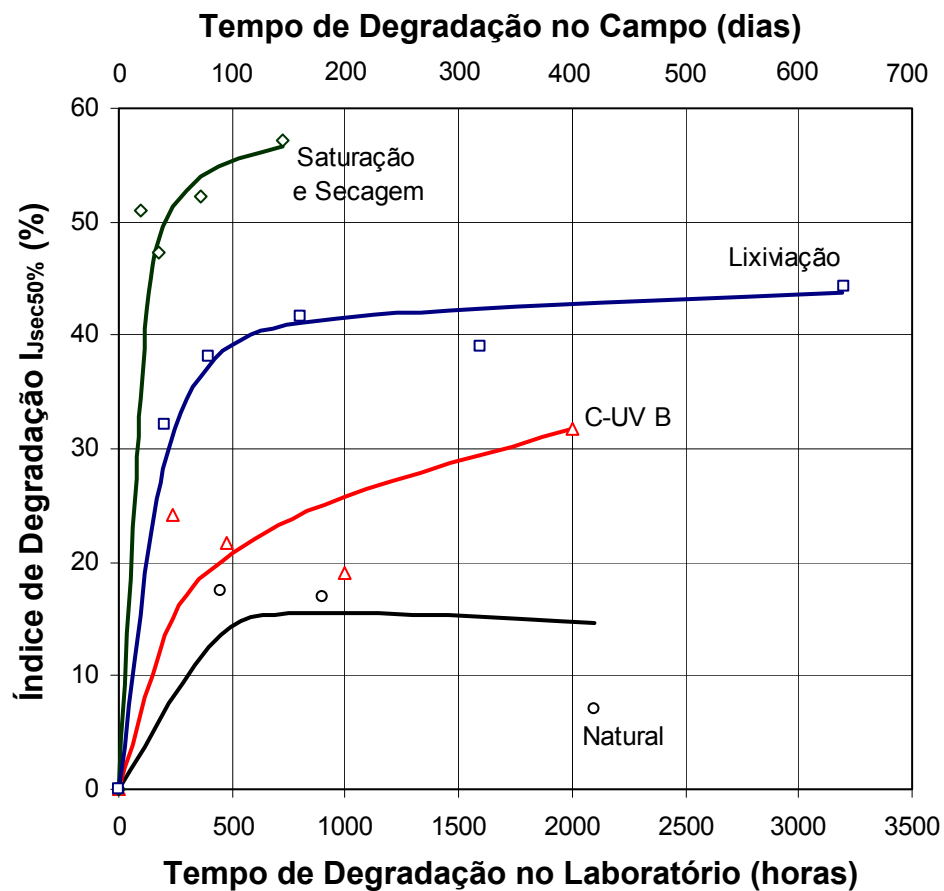


Figura 6.4 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 50% da carga de ruptura em tração, para a Amostra B.

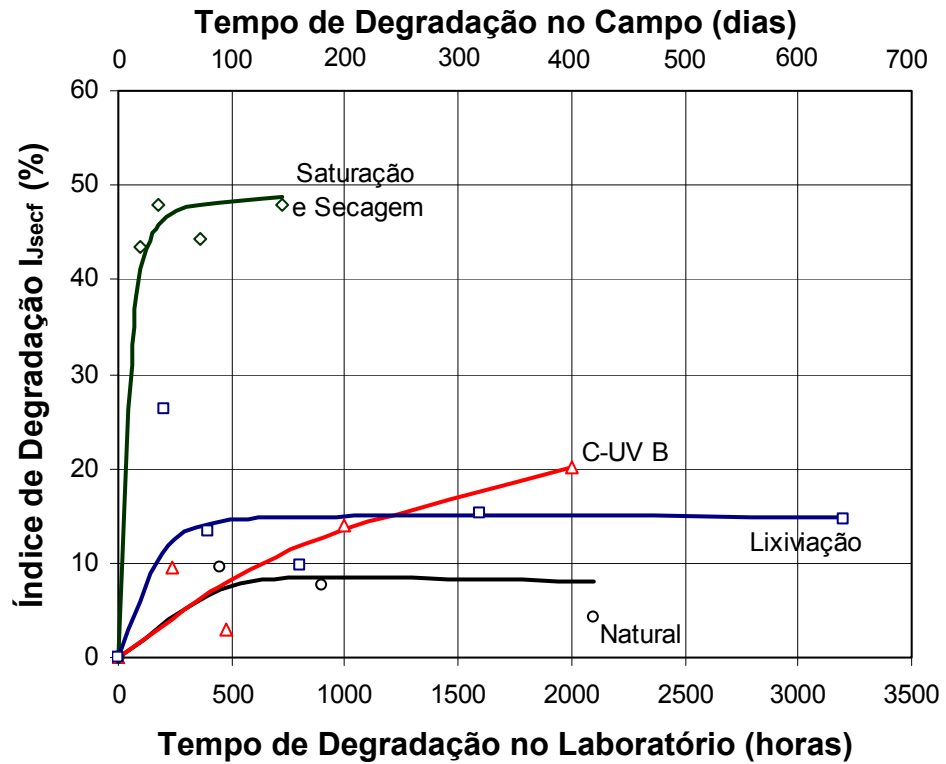


Figura 6.5 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante final para a carga de ruptura em tração, Amostra A.

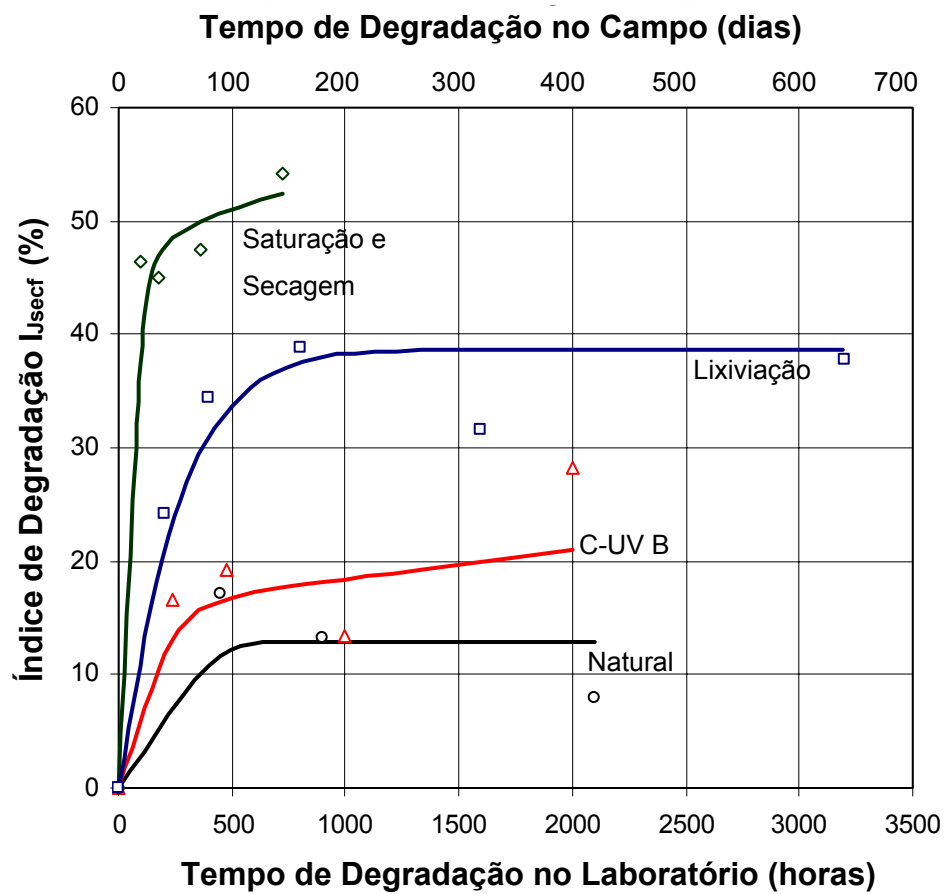


Figura 6.6 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante final para a carga de ruptura em tração, Amostra B.

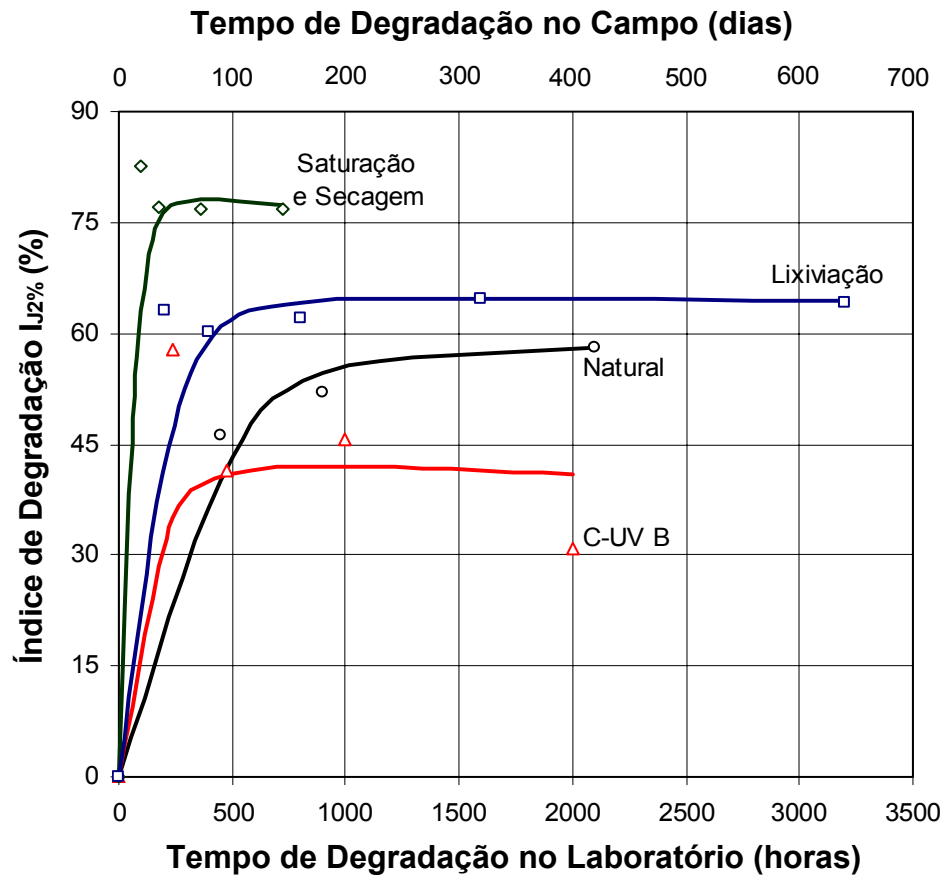


Figura 6.7 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 2% de deformação em tração, Amostra A.

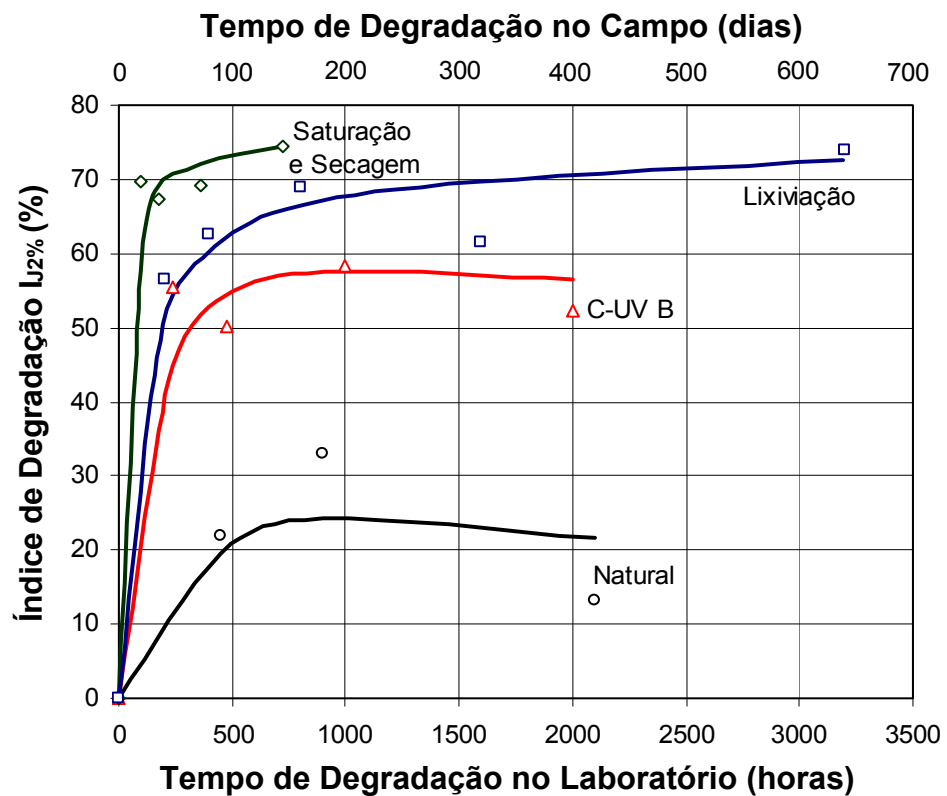


Figura 6.8 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 2% de deformação em tração, Amostra B.

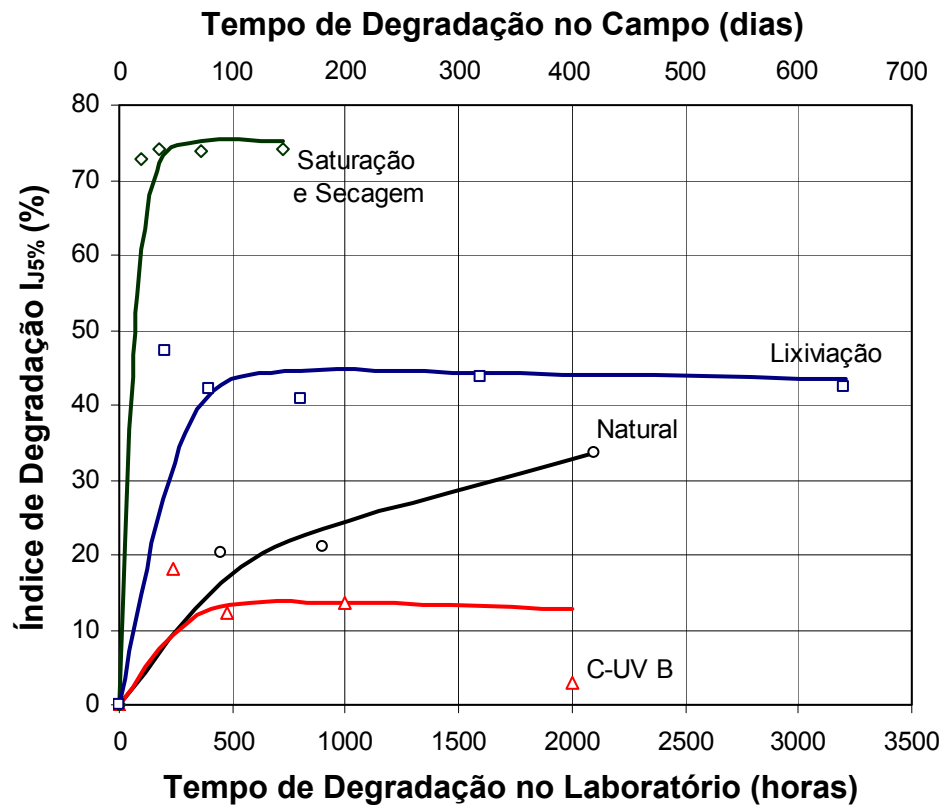


Figura 6.9 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 5% de deformação em tração, Amostra A.

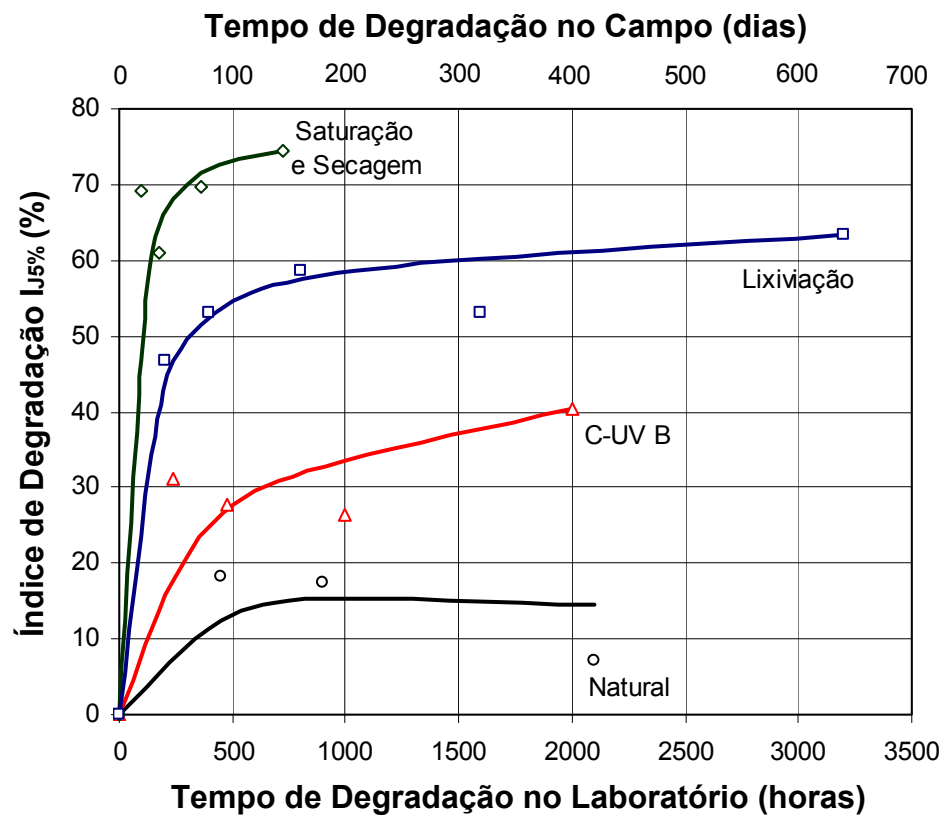


Figura 6.10 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 5% de deformação em tração, Amostra B.

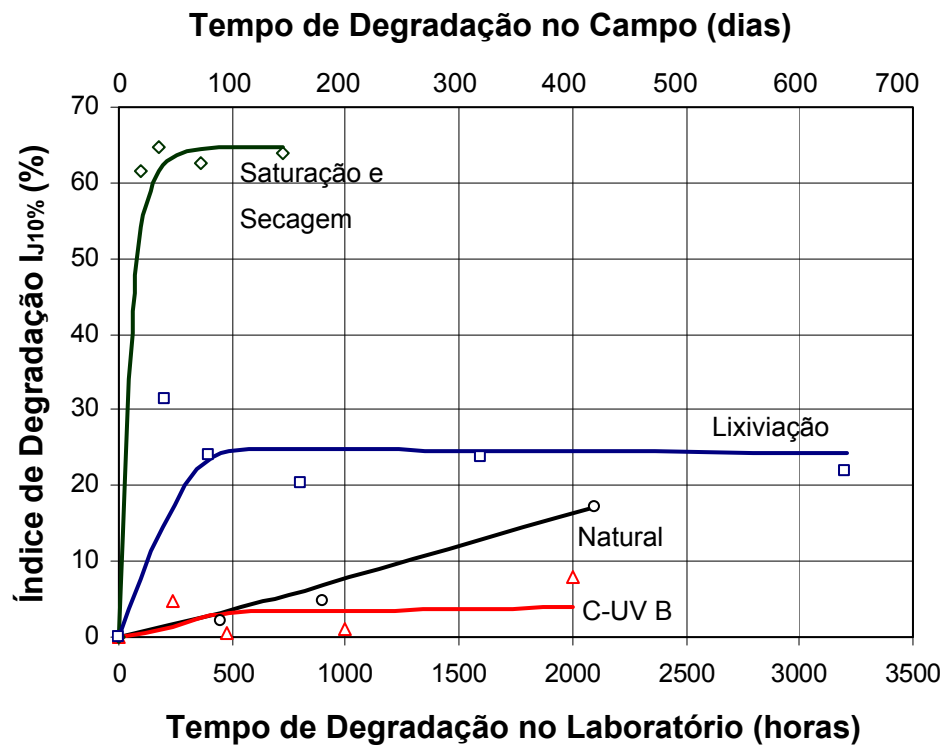


Figura 6.11 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 10% de deformação em tração, Amostra A.

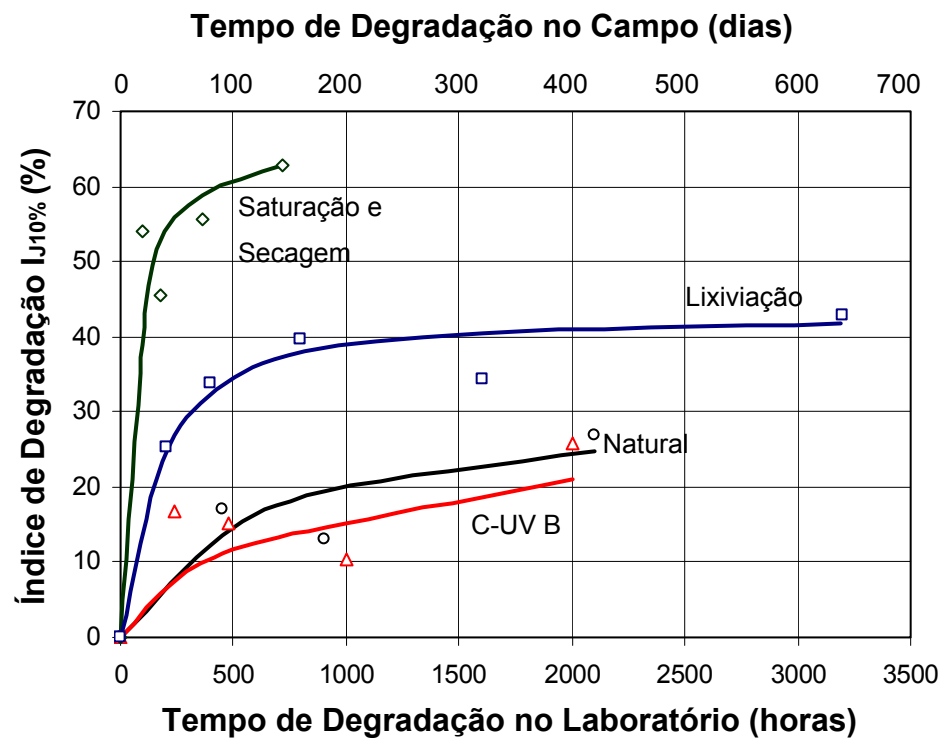


Figura 6.12 - Variação dos índices de degradação da rigidez secante a 10% de deformação em tração, Amostra B.

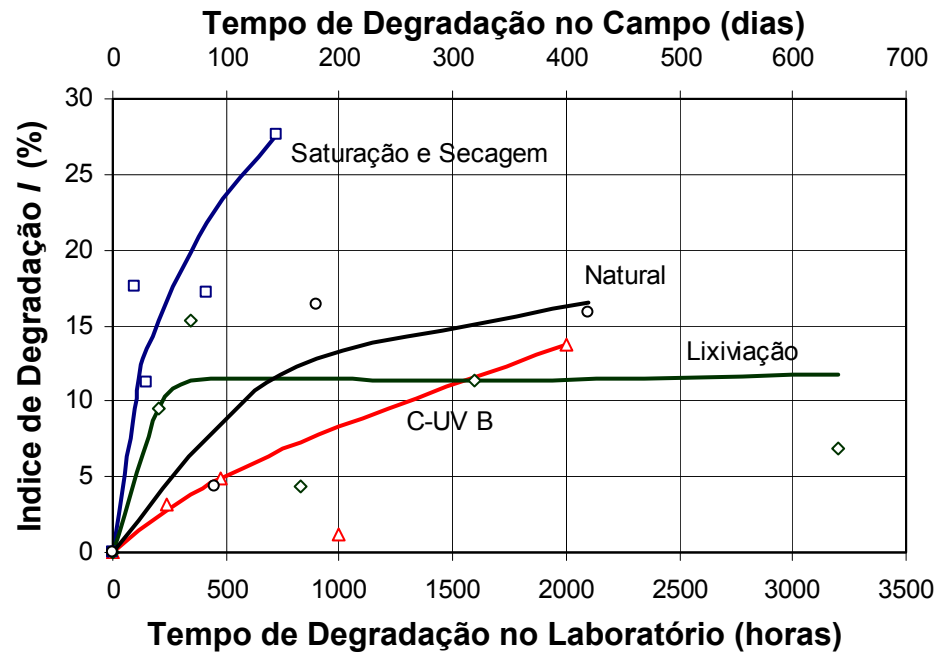


Figura 6.13 - Variação dos índices de degradação da carga de tração na ruptura, Amostra A.

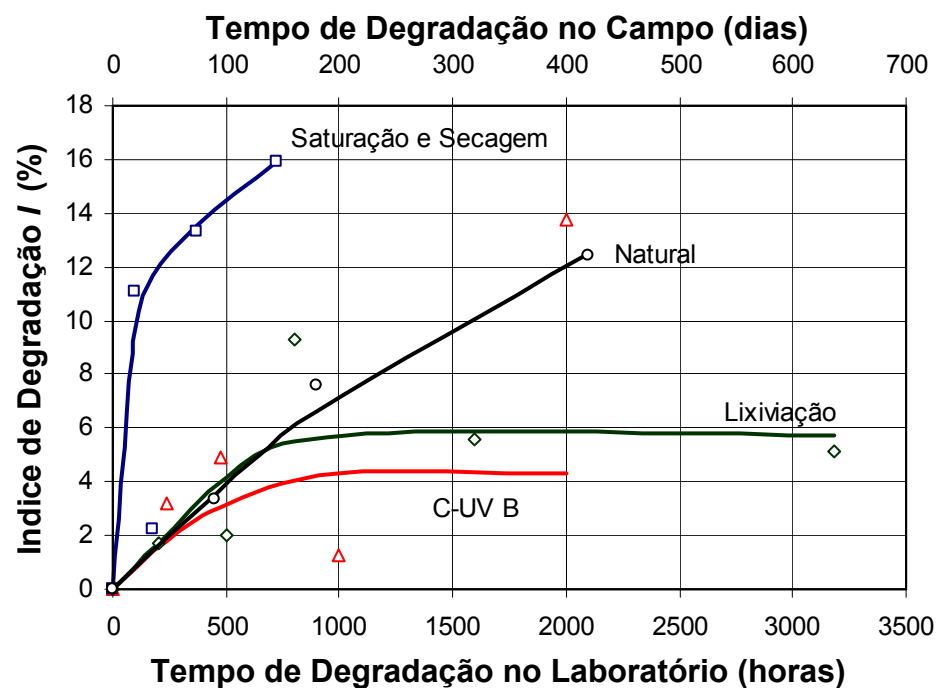


Figura 6.14 - Variação dos índices de degradação da carga de tração na ruptura, Amostra B.

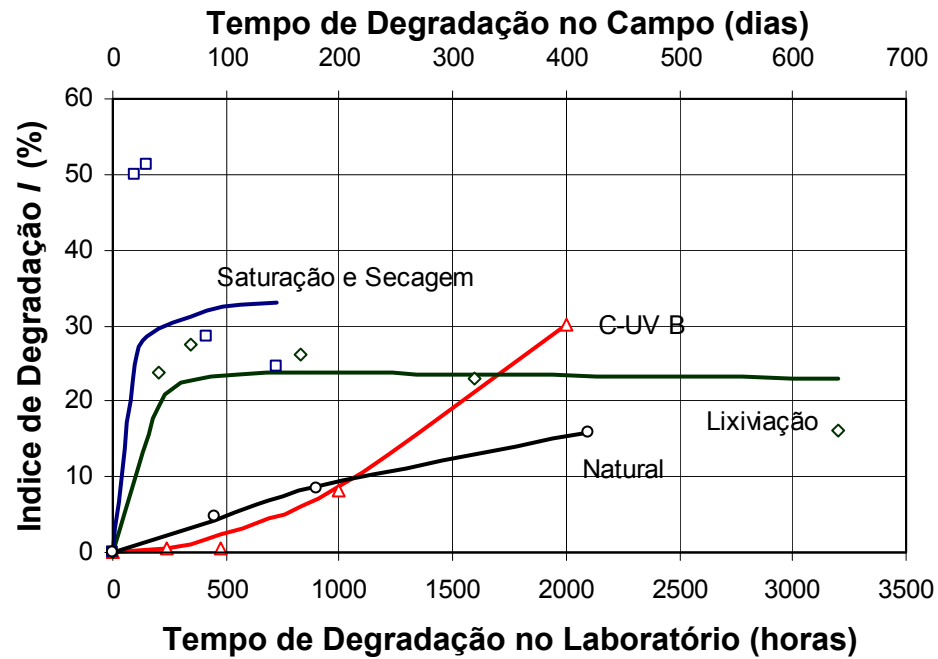


Figura 6.15 - Variação dos índices de degradação da deformação na ruptura em tração, Amostra A.

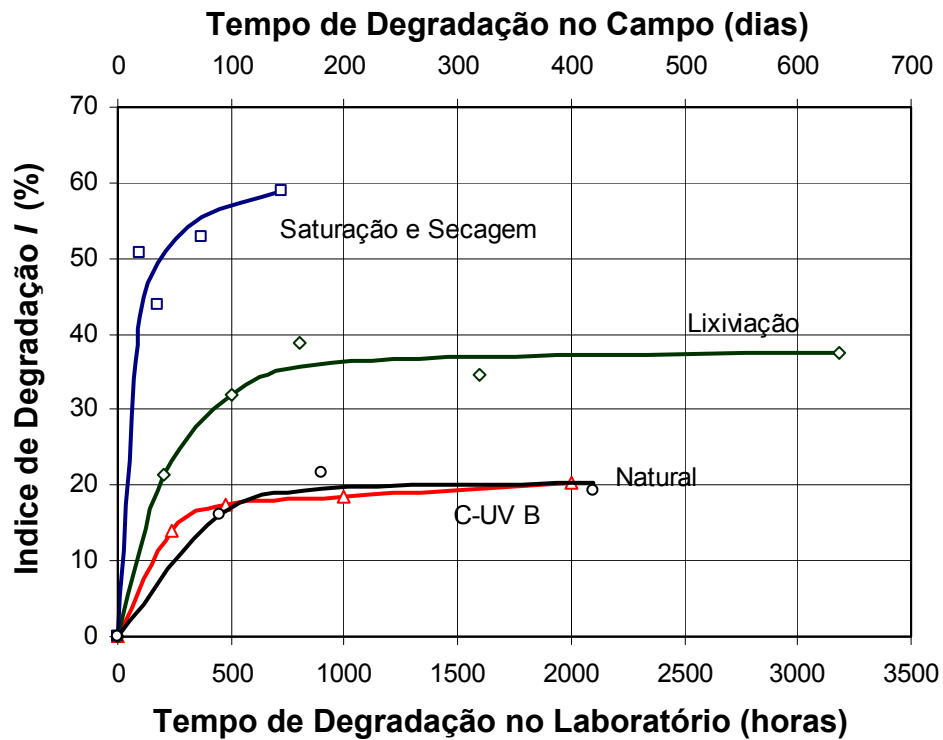


Figura 6.16 - Variação dos índices de degradação da deformação na ruptura em tração, Amostra B.

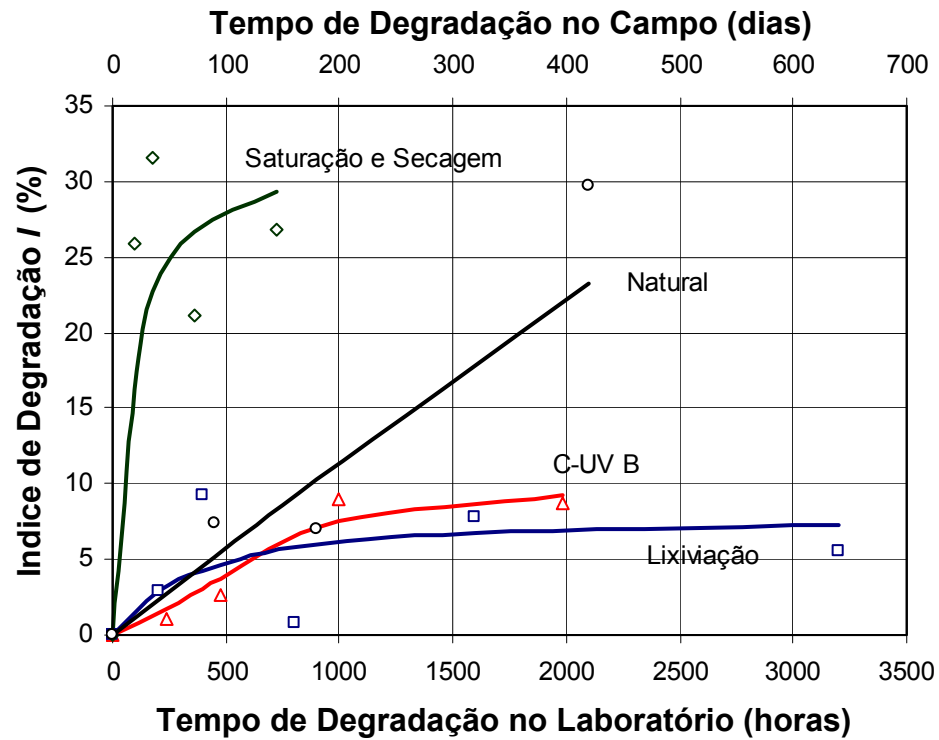


Figura 6.17 - Variação dos índices de degradação da força de penetração na ruptura, Amostra A.

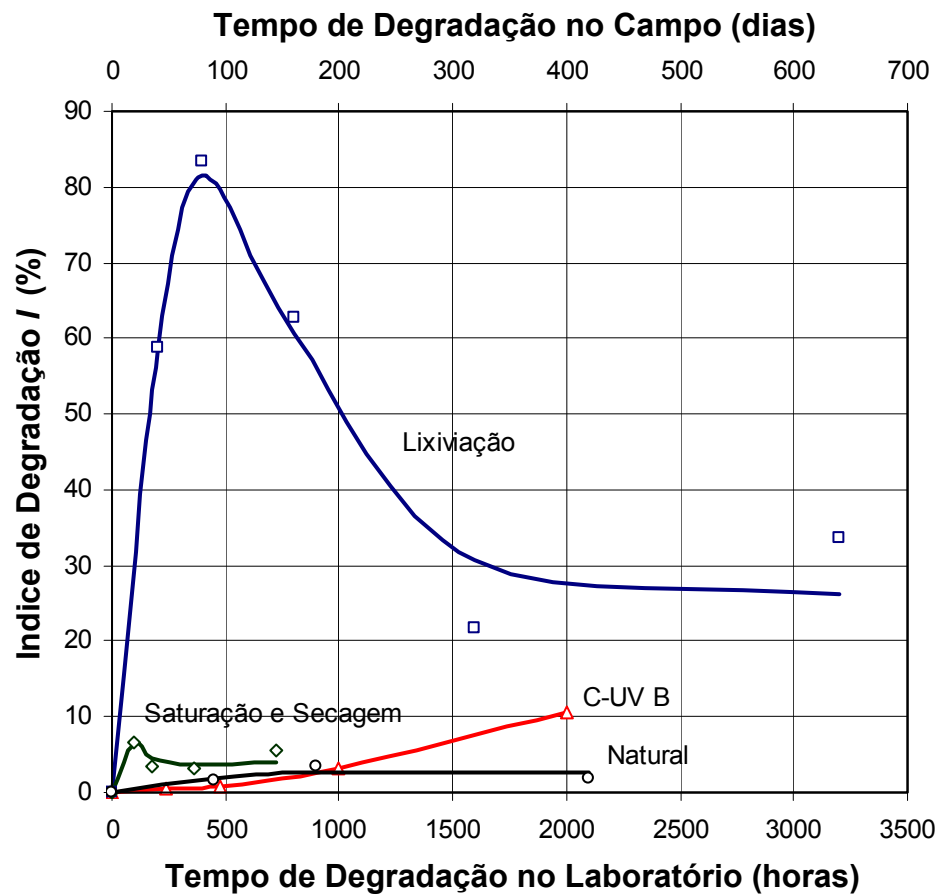


Figura 6.18 - Variação dos índices de degradação da força de penetração na ruptura, Amostra B.

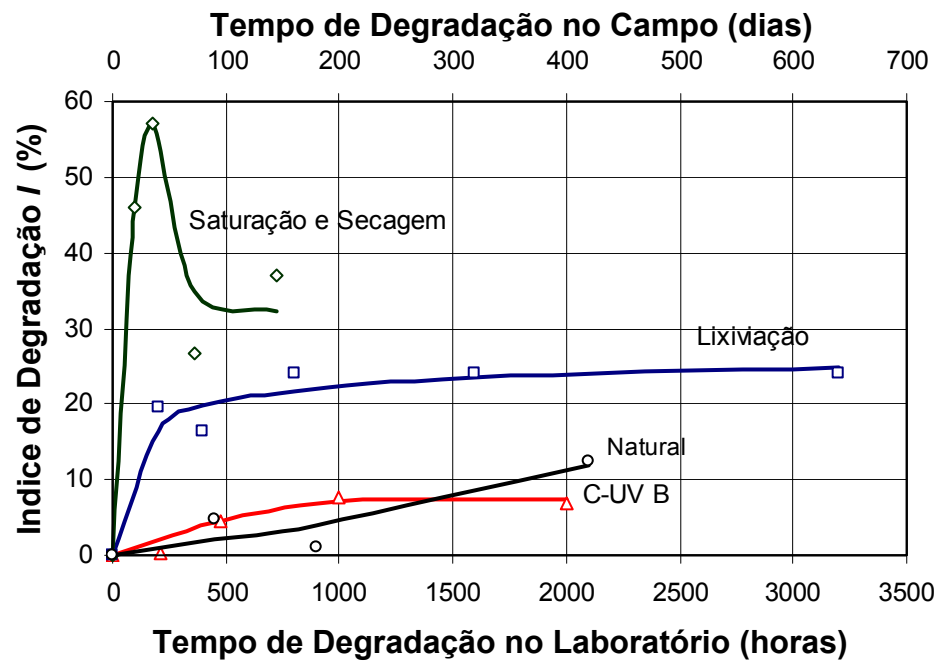


Figura 6.19 - Variação dos índices de degradação da penetração máxima no puncionamento, Amostra A.

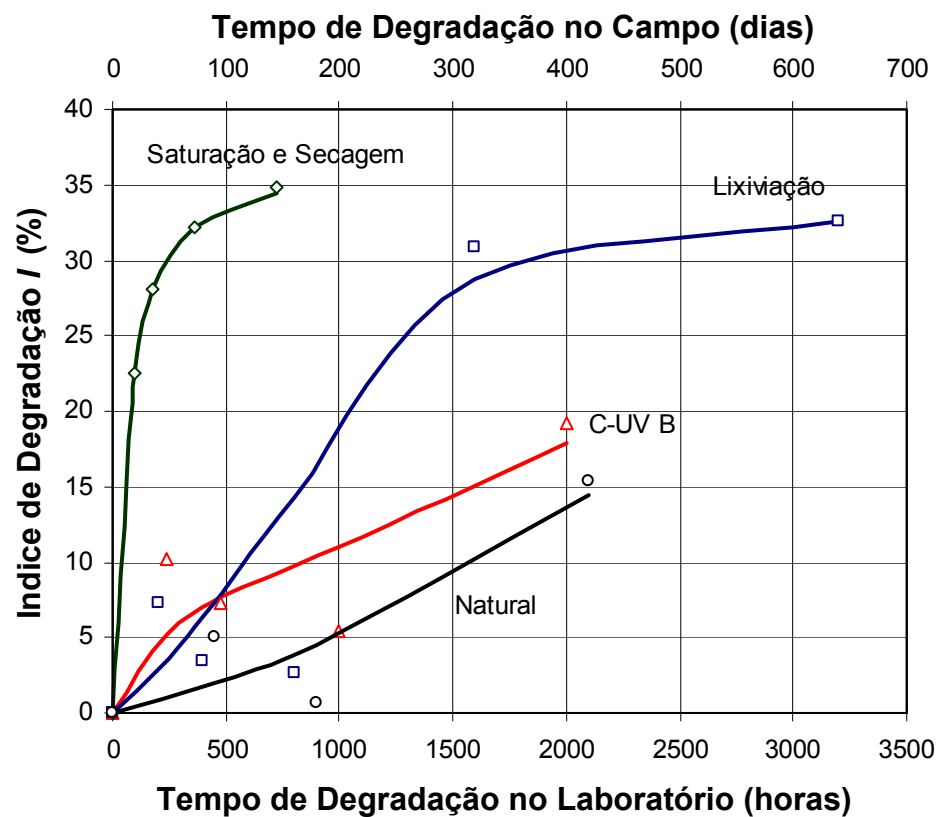


Figura 6.20 - Variação dos índices de degradação da penetração máxima no puncionamento, Amostra B.

6.3 – PREVISÃO DO COMPORTAMENTO

Para a previsão do comportamento do material a longo prazo faz-se necessário o conhecimento do índice de degradação de laboratório para um determinado tempo de degradação natural desejado. Para isto, determina-se o tempo de degradação no laboratório correspondente ao tempo de degradação natural desejado. Isto pode ser feito por meio de relações entre os tempos de degradação no campo e no laboratório. Com o tempo de degradação no laboratório pode-se fazer a determinação dos índices de degradação por meio da determinação dos parâmetros do material degradado no laboratório por extrapolação de dados experimentais ou determinação direta dos parâmetros em amostra degradada no laboratório com o tempo obtido. Determinado o índice de degradação do material de laboratório, eventualmente faz-se a correção deste índice, obtendo-se o índice de degradação natural de campo. Com os parâmetros do material intacto e o índice de degradação natural no campo podem-se determinar as propriedades do material para o tempo de degradação natural desejado por meio das equações 6.2 a 6.6.

6.3.1 – Fator de Correção dos Índices de Degradação

Das figuras 6.1 a 6.20, nota-se que o limite último do índice de degradação depende do procedimento de degradação no laboratório. Considerando que o estado último de degradação do material atinge um limite máximo constante (Figura 6.21), mesmo sendo influenciado pelo procedimento de degradação no laboratório, pode-se fazer a correção do limite último do índice de degradação no laboratório através de um fator de correção fc , definido pela Equação 6.7 (Figura 6.22):

$$I_{nat} = fc \times I_{lab} \quad \text{Equação 6.7}$$

onde, I_{nat} é o índice de degradação natural, fc é o fator de correção, específico para cada propriedade e tipo de degradação, e o I_{lab} é o índice de degradação de laboratório.

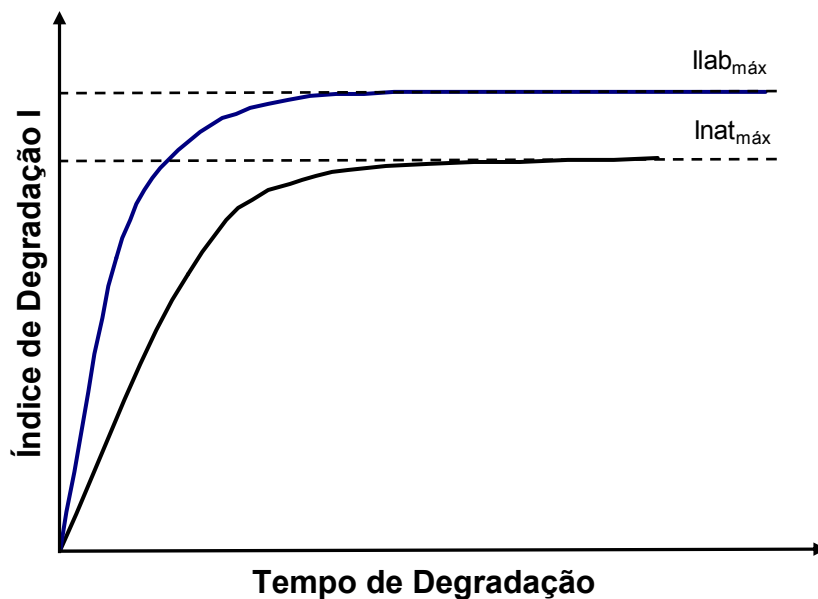


Figura 6.21 - Comparação entre o índice de degradação natural e o índice de degradação obtido no laboratório, em relação ao tempo de degradação, sem a correção.

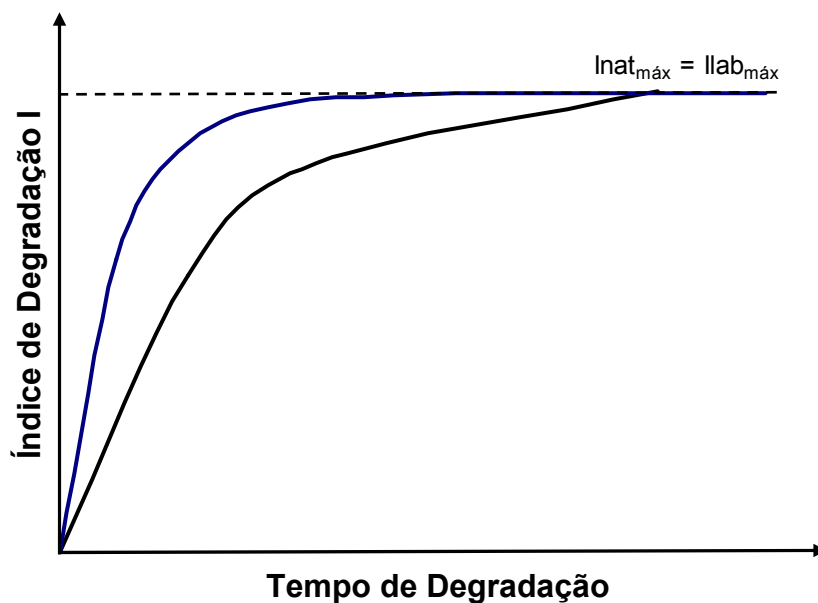


Figura 6.22 - Comparação entre o índice de degradação natural e o índice de degradação obtido no laboratório, em relação ao tempo de degradação, após a correção do índice de degradação no laboratório I_{nat} .

A Tabela 6.5 mostra, por exemplo, os valores do fator f_c das amostras A considerando a força de penetração na ruptura para os diferentes procedimentos de degradação. A determinação dos limites últimos dos índices de degradação foi feito por extrapolação dos resultados experimentais apresentados na Figura 6.17. A

extrapolação utilizou uma função do tipo logarítmica de melhor ajuste aos dados experimentais e um longo período de degradação, cerca de 10.000 anos.

Tabela 6.5 - Valores do fator de correção f_c para cada propriedade e tipo de degradação.

Tipo de Degradação	Fator de correção f_c
<i>Saturação e Secagem</i>	1,135
<i>Lixiviação Contínua</i>	0,160
<i>Radiação Ultravioleta</i>	0,532

6.3.2 – Relação entre os Tempos de Degradação

A obtenção da relação entre os tempos de degradação no campo e no laboratório é feita determinando-se o tempo de degradação no campo cujo índice de degradação no campo coincide com o índice de degradação no laboratório (Figura 6.23). Neste caso, o tempo de degradação no laboratório representa a mesma intensidade de degradação que o material sofre naturalmente no campo. Este procedimento de determinação é feito para diferentes índices de degradação e procedimentos de degradação no laboratório.

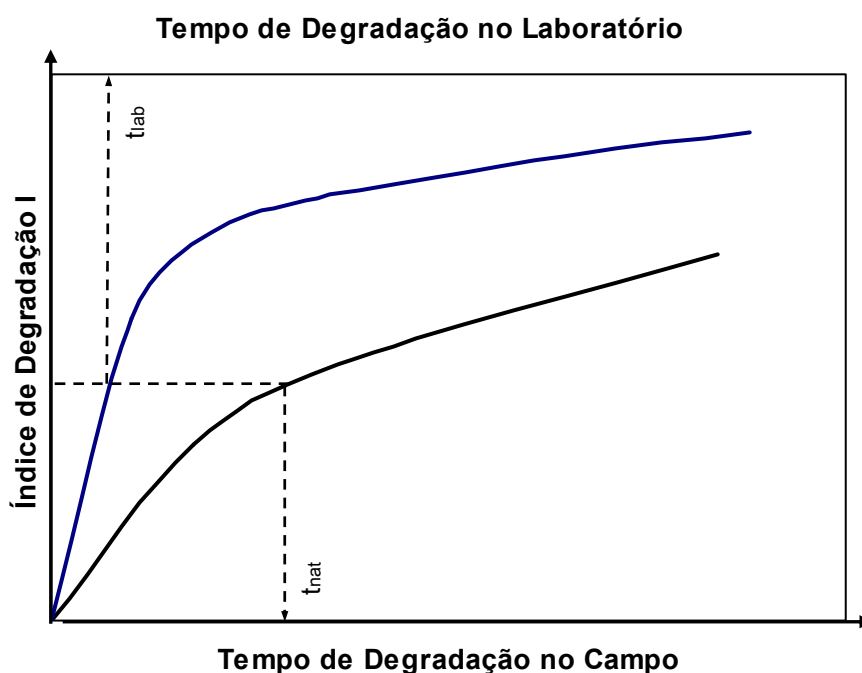


Figura 6.23 - Relação entre o tempo de degradação no campo e o tempo de degradação no laboratório para um mesmo valor do índice de degradação.

Por exemplo, a figura 6.24 apresenta a relação entre o tempo de degradação no campo e o tempo de degradação no laboratório para a força de penetração na ruptura da Amostra A.

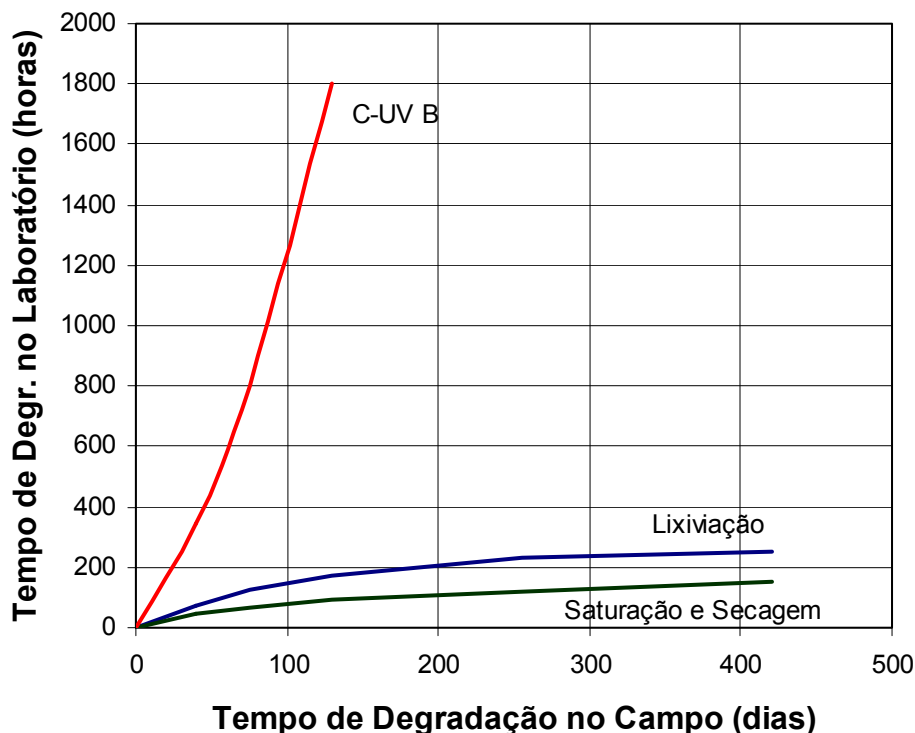


Figura 6.24 - Relação entre o tempo de degradação no campo (natural) e o tempo de degradação no laboratório pelo índice de degradação da força de penetração na ruptura de diferentes procedimentos de degradação, Amostra A.

6.3.2 – Exemplo de Previsão de Comportamento a Longo Prazo

Considerando-se a força de penetração, apresenta-se um exemplo de previsão de comportamento a longo prazo do geotêxtil correspondente a Amostra A, para 2, 10, 20 e 50 anos de degradação natural no campo.

A partir dos resultados apresentados na Figura 6.24 podem-se determinar os tempos de degradação no laboratório correspondentes a 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo (Tabela 6.6). Para isto, utiliza-se a extrapolação dos resultados experimentais por meio de funções de melhor ajuste matemático. Destaca-se que as funções de melhor ajuste obtidas foram logarítmicas ou exponenciais.

Tabela 6.6 – Tempos de degradação no laboratório correspondentes a 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.

Tipo de degradação	Tempo de degradação, em horas, no laboratório para			
	2 anos	10 anos	20 anos	50 anos
<i>Saturação e Secagem</i>	201	446	630	993
<i>Lixiviação Contínua</i>	303	429	484	555
<i>Radiação Ultravioleta</i>	19875	189205	499349	1801192

Com os tempos de degradação no laboratório, determina-se os índices de degradação no laboratório corrigidos através dos resultados apresentados na Figura 6.17 (Tabela 6.7).

Tabela 6.7 – Índice de degradação no laboratório corrigido para 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.

Tipo de degradação	Índice de degradação no laboratório corrigido para			
	2 anos	10 anos	20 anos	50 anos
<i>Saturação e Secagem</i>	23,12	26,77	28,34	30,42
<i>Lixiviação Contínua</i>	4,76	4,94	5,00	5,07
<i>Radiação Ultravioleta</i>	16,03	22,86	25,80	29,69

Com os índices de degradação no laboratório corrigidos, que iguais aos índices de campo, apresentados na Tabela 6.7, os fatores de correção f_c , apresentados na Tabela 6.5, e a Equação 6.7, determinam-se os índices de degradação no laboratório sem correção (Tabela 6.8).

Tabela 6.8 – Índice de degradação no laboratório sem correção para 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.

Tipo de degradação	Índice de degradação no laboratório sem correção para			
	2 anos	10 anos	20 anos	50 anos
<i>Saturação e Secagem</i>	20,37	23,59	24,97	26,80
<i>Lixiviação Contínua</i>	29,74	30,85	31,23	31,67
<i>Radiação Ultravioleta</i>	30,12	42,95	48,48	55,78

Com a força de penetração do material intacto P_{f0} (Tabela 5.5), os índices de degradação no laboratório sem correção (Tabela 6.8) e a Equação 6.5 pode-se determinar as forças de penetração P_f correspondentes a 2, 10, 20 e 50 anos de degradação natural (Tabela 6.9).

Tabela 6.9 – Força de penetração para 0 (intacto), 2, 10, 20 e 50 anos de degradação no campo.

Tipo de degradação	Força de penetração, em kN, para				
	0 anos (intacto)	2 anos	10 anos	20 anos	50 anos
<i>Saturação e Secagem</i>	23,07	19,17	18,67	18,46	18,19
<i>Lixiviação Contínua</i>	23,07	17,78	17,63	17,58	17,52
<i>Radiação Ultravioleta</i>	23,07	17,73	16,14	15,54	14,81

Nota-se que os resultados apresentados na Tabela 6.9 indicam uma sensível redução da força de penetração com o tempo de degradação natural. No entanto, a maior taxa de redução da força ocorre nos menores tempos de degradação.

Verifica-se da Tabela 6.9, também, que a estimativa feita a partir de diferentes procedimentos de degradação resulta em diferentes valores de força de penetração do material degradado. Particularmente o procedimento de ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta indica uma superestimativa dos efeitos da degradação, apresentando os menores valores de força de penetração.

Capítulo 7 - CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo da degradação natural e acelerada de duas amostras de geotêxteis, sendo para tanto executado um extenso programa experimental no campo e no laboratório. As principais conclusões estão listadas a seguir.

7.1 – QUANTO À METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

As metodologias e os procedimentos para a degradação no campo ou no laboratório mostraram-se eficientes para obtenção dos parâmetros dos materiais estudados. Ressalta-se que para sanar a desvantagem do elevado tempo necessário para o desenvolvimento dos procedimentos de degradação e das repetições dos ensaios mecânicos, as dimensões dos corpos de prova foram reduzidas. Devido a este fato, foram desenvolvidos garras e suportes especiais que foram adaptados aos equipamentos de ensaios, obtendo-se resultados satisfatórios.

7.2 – QUANTO À MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise por microscopia eletrônica de varredura mostrou que a estrutura física do geotêxtil estudado não é afetada significativamente pelos processos de degradação natural, por lixiviação contínua ou por ciclos de condensação e exposição à radiação ultravioleta. No entanto, para intensos níveis de degradação observa-se o início da pulverização e uma sensível dilatação das fibras do geotêxtil, principalmente para a degradação por ciclos de saturação e secagem.

7.3 – QUANTO À DISPERSÃO DOS RESULTADOS

Os valores de CV indicam que a degradação no campo ou no laboratório não afeta sistematicamente a dispersão dos valores das propriedades mecânicas estudadas. Isto indica que os resultados experimentais obtidos podem ser representativos do comportamento dos materiais frente aos processos de

degradação no campo ou no laboratório. No entanto, nota-se que o eventual aumento dos valores do coeficiente CV para os materiais degradados no campo ou no laboratório em relação ao material intacto, indicam um aumento da heterogeneidade dos materiais devido a degradação. Isto pode indicar que a degradação ocorreu de forma não homogênea nos materiais estudados.

7.4 – QUANTO À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Verifica-se que a quantidade de aditivos antioxidantes afeta significativamente e de forma distinta o comportamento carga de tração vs. deformação devido à degradação natural dos geotêxteis. Este comportamento indica que a redução da quantidade de aditivos antioxidantes altera a rigidez do geotêxtil.

Dos resultados apresentados, nota-se que o comportamento carga de tração vs. deformação é significativamente afetado para baixos tempos de degradação, independentemente do processo de degradação. No entanto, a degradação por ciclos de saturação e secagem é o procedimento que gera os maiores efeitos de degradação.

Observa-se que os efeitos da degradação nos materiais estudados aumenta com os níveis de deformação à tração.

Considerando que a eficiência dos procedimentos de degradação acelerada é determinada pela velocidade com que se simula a condição natural de campo, conclui-se que o procedimento de degradação acelerada no laboratório por ciclos de saturação e secagem foi o procedimento mais agressivo.

7.5 – QUANTO À RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO

De modo geral, ocorre a redução da força de puncionamento com a degradação, tanto no campo quanto no laboratório para os dois geotêxteis. Nota-se que existe a estabilização da resistência ao puncionamento com a degradação no laboratório.

O procedimento de degradação por ciclos de saturação e secagem é o mais eficiente, pois com este necessita-se de períodos curtos de exposição do material à degradação acelerada no laboratório. A degradação pelo procedimento de lixiviação contínua também mostra-se bastante eficiente.

7.6 – QUANTO À PREVISÃO A LONGO PRAZO

Esta pesquisa mostrou que não existe uma relação linear e única que correlaciona os tempos de degradação no campo e no laboratório. Verifica-se também que as relações dependem do procedimento de degradação no laboratório. Tal comportamento se justifica pelo condicionamento a mecanismos específicos de degradação no material submetido a procedimentos acelerados em laboratório. Espera-se dos resultados obtidos, deste modo, que não ocorre um mecanismo de degradação característico durante a exposição do material aos agentes de degradação no campo, devendo existir a sobreposição dos efeitos dos diferentes mecanismos.

Dos resultados obtidos neste trabalho observa-se que os materiais estudados são consideravelmente resistentes à degradação natural no campo, garantindo, deste modo, a sua funcionalidade para longos períodos de exposição às condições de degradação do meio ambiente.

7.7 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados e conclusões obtidos neste trabalho, são sugeridas algumas propostas de continuidade para esta pesquisa:

- Realização de procedimentos de degradação com outros tipos de geossintéticos;
- Utilização de tempos de exposição aos mecanismos de degradação, principalmente degradação natural, maiores que os utilizados nessa pesquisa;
- Realização de procedimentos de degradação com mecanismos de degradação químicos e biológicos;
- Realização de procedimentos de degradação no laboratório envolvendo os diferentes mecanismos de degradação concomitantemente;
- Avaliação dos efeitos da degradação em corpos de prova exumados em casos de obras antigas ou em campos experimentais;
- Avaliação do efeito do clima na degradação dos geossintéticos.

Capítulo 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABINT, 2004. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Edgard Blücher. São Paulo, 413 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1993. Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga. NBR 12824 , 04/1993.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Geossintéticos - Terminologia. 1997. NBR 12553.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1995. Geotêxteis - Determinação da resistência ao puncionamento estático - Ensaio com pistão tipo CBR. NBR 13359 05/1995.
- ABRAMENTO, M. 1995a. Durabilidade e Comportamento de longo prazo de Geossintéticos – Parte 1: Propriedades Mecânicas e Hidráulicas, *Geossintéticos'95*, 216-225.
- ABRAMENTO, M. 1995b. Durabilidade e Comportamento de longo prazo de Geossintéticos – Parte 2: Durabilidade dos materiais, *Geossintéticos'95*, 226-235.
- AGNELLI, J. A. M. 1999. Curso sobre Degradação, Estabilização e Envelhecimento de Polímeros. Associação Brasileira de Polímeros, 209 p.
- ANDRADY, A.L.,1997. Wavelength sensitivity in polymer photodegradation. *Advances in Polymer Sciences* 128:49-94.
- AMOCO - Amoco Fabrics and fibers Co.;1992. Ultraviolet Light Degradation. Technical Note nº 9, 8 p.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics. D 1435. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. Methods of Testing Fabrics Woven from Polyolefin Monofilaments (Discontinued 1990), Replaced by no Replacement. D 3334. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Exposure to Ultraviolet Light and Water (Xenon-Arc Type Apparatus). D 4355. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids. D 5322. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Practice for In Field Immersion Testing of Geosynthetics. D 5496. USA.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure. D 5970. USA.

- ASTM - American Society for Testing and Materials Standard Practice for Operating Light-Exposure Apparatus (Xenon-Arc Type) With and Without Water for Exposure of Nonmetallic Materials (Discontinued 2000), Replaced by G155. G 26. USA.
- AZEVEDO, 2000. 16° Boletim Climatológico, Rio de Janeiro.
- BERG, R.R., 1993. Guidelines for design, specification and contracting of geosynthetic mechanically stabilized earthslopes on firm foundations. *U.S.Department of Transportation*, FHWA-AS-93-025-879.
- BIDONE, F.R. e COTRIN, S.L., 1988. Perfil de temperaturas em células de aterros sanitários destinadas ao tratamento de resíduos sólidos urbanos. *II Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental – Gerenciamento de Resíduos e Certificação Ambiental*, Porto Alegre, p. 87-97.
- BUDIMAN, J.;1994. Effects of temperature on physical behavior of geomembrane, *Proc. of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and related Products*. Singapore, 1093 – 1096.
- CALLISTER, JR., 2002. *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução*. Quinta Edição. LTC. Rio de Janeiro, Brasil, 589p.
- CASTRO, D. C., 1999. Ensaio de Arrancamento de Geogrelhas no Campo e no Laboratório. Dissertação de Mestrado, Departamento de Eng. Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 142p.
- CAZZUFFI, D.A.; FEDE, L.; MONTANELLI, F.; RIMOLDI, P., 1994. Outdoor and UV-B Laboratory Weathering Resistance of Geosynthetics. *5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Correlated Products*, Cingapura, 1195-1198.
- CHIN, J.W.; MARTIN, J.; NGUYEN, T., 1995. *Gap Analysis for Durability of Fiber Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, Chapter 8 - Effect of Ultraviolet (UV) Radiation* p.80-88.
- FANNIN, R. J., e HERMANN, S., 1990. Performance data for sloped reinforced wall. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp. 1411-1443.
- FERREIRA,V.A.S.;2004. *A Interação da Radiação Ultravioleta com Materiais Geossintéticos: uma abordagem de divulgação científica para o ensino médio*. Monografia, Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes,15p.
- FRAZÃO, E. B., 1993. Metodologia para Avaliação da Alterabilidade de Rochas a Partir de Estudo Experimental em Amostras de Basalto da UHE de Três Irmãos - Estado de São Paulo. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, p. 1-175.
- GIJSMAN, P; MEIJERS, G; VITARELLI, G, 1999. Comparison of the UV-degradation chemistry of polypropylene, polyethylene, polyamide 6 and polybutylene terephthalate. *Polymer Degradation and Stability*, v. 65, n°. 3, p. 433-441.
- GIROUD, J. P. and PEGGS, I. D., 1990. Geomembrane Construction Quality Assurance. Bonaparte, R. (ed) *Geotechnical Special Publication. Waste Containment System Construction, Regulation and Performance*, ASCE, n°26, p. 190-225.

- GREENWOOD, J.H., e MYLES, B., 1986. Creep and stress relaxation of geotextiles, *Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles*, Viena, p.821-826.
- GRI Test Method GM 11. Accelerated Weathering of Geomenbranes using a Fluorescent UV A- Condensation Exposure Decive.
- HARROCKS, A.R.; D' SOUZA, J.A., 1990. Physicochemical changes in laboratory-aged polypropylene tapes – the effects of stress and humidity. *Fourth International Conference on Geotextiles, Geomenbranes and Related Products*, The Hague. Rotterdam, A.A. Balkema, v.2, p. 709-714.
- HUESKER (2003). Catálogo de especificações de produtos. <http://www.huesker.com>
- INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY(IGS), <http://www.geosyntheticssociety.org/>
- IAA/SONDOTÉCNICA, 1984. Projeto de Irrigação e Drenagem da Cana-de-açúcar na Região Norte-Fluminense: Estudo de Reconhecimento Geral, Rio de Janeiro.
- KOERNER, R., WAYNE, M.H., e CARROLL, R.G., 1989. Analytic behavior of geogrid anchorage. *Proceedings Geosynthetics 89 Conference*, IFAI, St. Paul, Minn., p. 525-536.
- KOERNER, R., 1992. *Desiging With Geossintheitics*. Second Edition. Prentice Hall Inc.,New Jersey, USA, 652 p.
- KOERNER, R. ,1994. *Desining with Geosynthetics*. Prentice Hall, 783p.
- KOERNER, R. e SOONG, T.Y., 1997. The evolution of Geosynthetics, *Journal of ASCE*, July, p. 62-64.
- KOERNER, R., 1998. Photo-Initiated Degradation of Geotextiles, *Journal of ASCE*, V. 124, N° 12, p 1159-1166.
- LIU, X.; NANJUNDAPPA, R.; e CHO, U.,1999. *Durability of Geotextiles, Nonwovens Science and Technology II*, College of Education, Health and Human Sciences Consumer Services Management Department.
- LÓPEZ, A. L., 1997. Geotextiles y Productos Relacionados. *Tipos, Definiciones y Utilizacion, Curso Sobre Tecnicas Generales de Refuerzo del Terreno y sus Aplicaciones*, Tomo I, Madrid, CEDEX, p. 1-27.
- LORD, A. E., Jr., HSUAN, Y. G., e KOERNER, R. M., 1993. Time-Temperature Superposition in Mechanical Durability Testing of Polyethilene Geomembranes, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, v 16, n°. 2, p. 259-262.
- McGOWN, A., ANDRAWES, K. Z., KABIR, M. H., 1982. Load Extension Testing of Geotextiles Confined in Soil. *Proceedings of the II International Conf. Geotextiles*, Las Vegas, NV, IFAI, pp. 793-796.
- MAIA, P.C.A., 2001. Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos. Tese de Doutorado, Departamento de Eng. Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 336 p.
- MATHEUS, EVALDO, 2002. Efeitos do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintéticos.

- Tese de Doutorado. Publicação G.TD-010A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 284p.
- MINETTE, E., 1982. Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, RJ, p. 1-262.
- MURPHY, V. P., e KOERNER, R. M., 1988, CBR Strength (Puncture) of Geosynthetics, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, v. 11, n°. 3, p. 167-172.
- PALMEIRA, E.M., 1995. Evolução dos geossintéticos no Brasil, *2º Simpósio Brasileiro Aplicações de Geossintéticos – Palestras especiais*, ABMS, São Paulo, p. 5-15.
- PALMEIRA, E. M.;1996. Utilização de Geossintéticos em Geotecnia Ambiental. Notas de Aula, Universidade de Brasília, Brasília, 100 p.
- PANDOLPHO, J.R., e GUIMARÃES, D.G., 1995. Durabilidade de geotêxteis de poliéster expostos ao intemperismo, *2º Simpósio Brasileiro Aplicações de Geossintéticos – Palestras especiais*, ABMS, São Paulo, p. 209-216.
- PESAGRO – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro, 2005.
- RANBY, B. e RABEK, J.F., 1975. *Photodegradation, Photo-oxidation and Photostabilization of Polymers*. London, John Wiley e Sons Ltd., 573p.
- RAYNOND, G. P.;1999. Railway Rehabilitation Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, no 17, pp. 213-230.
- RIMOLDI, P., e MONTANELLI, F., 1993. Creep and accelerated creep testing for Geogrids. *Proceedings. Geosynthetics'93*, Vol. 2, pp. 773-787.
- ROSA, D. S., 1996. Correlação entre Envelhecimentos Acelerado e Natural do Polipropileno Isotático (PPI), Tese de Doutorado, UNICAMP.
- ROBENFELD, L. e COOKE, T.F.;1988. Structure and Properties of Fibers in Relation to Durability of Geotextiles. *Durability and Aging of Geosynthetics*, R.Koerner Editor, Elsevier, N.Y., p.48-64.
- SCHNEIDER, H., 1988. Long term Performance of Polypropylene Geosynthetics. *Durability and Aging of Geosynthetics*, R. Koerner Editor, Elsevier, N.Y., p.95-108.
- TISINGER, L.G., CLARK, B.S., GIROUD, J.P., e CHRISTOPHER, B.R., 1993. Analysis of exposed polypropylene geotextile, *Proceedings of Geosynthetics'93*, Vancouver, Canada, v. 2, p. 757-771.
- TISINGER, L.G., CLARK, B.S., GIROUD, J.P., e SCHAUER, D.A., 1994. Performance of non-woven geotextile exposed to a semi-tropical environment, *Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Singapore, p. 1223-1226.
- SPECIAL CHEM S.A., Polymer Additives e Colors, <http://www.specialchem.com>
- STEVENS, M. P., 1990. *Polymer Chemistry: An Introduction*. Oxford University Press, EUA.
- VALINHO, R. F.; FERREIRA, V. A. S.; CUNHA, V.; MAIA, P. C. A. (2004) Avaliação quantitativa da degradação de diferentes tipos de geossintéticos. *Primeiro Simpósio de Jovens Geotécnicos – GEOJOVEM 2004*, São Carlos.

- VAN ZANTEN, R.V., 1986. *Geotextiles and Geomenbranes in Civil Engineering*. Rotterman, A.A. Balkema. Chapter 6, p. 101-241.
- VAN VLACK, L., 1984. *Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais*. São Paulo, 567p.
- VIDAL, D., 1998. Propriedades Físicas, Mecânicas e Hidráulicas dos Geossintéticos - Curso sobre Aplicações de Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente, São Paulo, B1-B42.