

**RAQUEL OFRANTE SALLES**

**DURABILIDADE DE GEOSINTÉTICOS EM EQUIPAMENTO DE DEGRADAÇÃO  
EM LABORATÓRIO**

“Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientadores:

Paulo César de Almeida Maia  
Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**

Campos dos Goytacazes, 11 de agosto de 2006.

*A Bruno, à Minha Família e aos verdadeiros amigos.*

## AGRADECIMENTOS

À UENF e FAPERJ pelo apoio financeiro.

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

Ao Laboratório de Engenharia Civil pela disponibilidade dos laboratórios e pessoal técnico, possibilitando o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

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

Ao professor Alberto Sayão pela contribuição e atenção dada como orientador.

Aos técnicos e bolsistas de laboratório do LECIV e LAMAV que contribuíram na execução do projeto do equipamento e dos ensaios, em especial aos técnicos André, Vanuzia e Milton, e aos bolsistas Vítor, Moisés e Diego.

Ao técnico Paulo Ramos do Instituto de Energia Nuclear do Rio de Janeiro pela execução do ensaio de microscopia ótica.

A todos colegas da UENF, em especial a amiga Caroline Espinosa Viana pela valiosa e indispensável ajuda.

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

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

A Bruno que sempre esteve ao meu lado me ajudando a transpor todos momentos difíceis da dissertação com muita compreensão e paciência.

À Deus que sempre esteve ao meu lado, guiando o meu caminho e me fortalecendo para transpor todos os imprevistos e momentos difíceis.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação do comportamento de Geotêxteis Tecidos constituídos de polipropileno, com quantidades diferentes de aditivos antioxidantes, submetidos a processos de degradação natural no campo e acelerada no laboratório. No laboratório, as amostras foram expostas em um equipamento de degradação de grandes dimensões, desenvolvido nesta pesquisa, capaz de submeter amostras de grandes volumes a combinados processos e mecanismos de degradação, buscando representar de forma mais satisfatória a degradação do material no campo. No equipamento, as amostras são submetidas a variações de temperatura e umidade através de dois processos de lixiviação com água destilada e posterior secagem parcial. Dois níveis de temperatura da água de lixiviação foram escolhidos de acordo com o gradiente de temperatura desejado. O programa experimental, desenvolvido para verificar a funcionalidade do equipamento, constituiu-se de análises por microscopia ótica, espectrometria dispersiva de raios-X (EDX), resistência à tração não-confinada e resistência ao punctionamento estático. A avaliação da eficiência do equipamento de degradação foi feita através da comparação dos resultados desta pesquisa com os obtidos por Cunha Pinto (2006) para a degradação de geotêxteis no campo e no laboratório por lixiviação contínua e ciclos de umedecimento e secagem. Os resultados mostram que os materiais são afetados pela degradação no equipamento. Além de modificações nas propriedades mecânicas foram observadas mudanças na textura e no aspecto do entrelaçamento das fibras do material. Os resultados obtidos indicam que a degradação provocada pelo equipamento reproduz satisfatoriamente as condições de degradação natural no campo.

**Palavras-Chave:** Geotêxteis, Degradação, Equipamento de Degradação, Lixiviação, Resistência mecânica, Microscopia.

## ABSTRACT

This work presents an assessment of the behavior of polypropylene woven geotextiles, with different amounts of antioxidant additives, exposed to procedures of natural degradation in the field and of accelerated degradation in the laboratory. In laboratory, the samples were exposed in a large dimension degradation equipment, developed in this search, capable of submitting large volume samples to combining processes and mechanisms of degradation, trying to represent satisfactorily the degradation in the field. In the equipment, the samples are submitted to a variation of temperature and moisture by two processes: leaching with distilled water and subsequent partial drying. Two levels of temperature for the leaching were considered, which were chosen in accordance to the desired temperature gradient. The experimental program, developed to verify the equipment's functionality was based on analysis made by optical microscopy, X-ray dispersive spectrometry, unconfined tensile strength and punching strength tests. The efficiency assessment of the degradation equipment was made by comparing the results of this research with the results obtained by Cunha Pinto (2006) for degradation of geotextiles in field and in laboratory under continuous leaching and wetting-drying cycles. The results show that the materials are affected by degradation in the equipment. Besides changes in the mechanical properties, changes in texture and fibers interlacement aspect of the material were also noted. The results indicated that the degradation caused by the implemented equipment reproduces satisfactorily the natural degradation conditions in the field.

**Keywords:** Geotextiles, Degradation, Degradation Equipment, Leaching, Mechanical Strength, Microscopy.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</i>	<i>1</i>
1.2. <i>OBJETIVOS DA PESQUISA .....</i>	<i>2</i>
1.3. <i>ESCOPO DA PESQUISA .....</i>	<i>3</i>
<b>CAPÍTULO 2 – DEGRADAÇÃO EM MATERIAIS GEOTÉCNICOS .....</b>	<b>4</b>
2.1. <i>INTRODUÇÃO.....</i>	<i>4</i>
2.2. <i>DEFINIÇÕES INICIAIS.....</i>	<i>4</i>
2.3. <i>CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS .....</i>	<i>5</i>
2.3.1. <i>Materiais Cerâmicos .....</i>	<i>6</i>
2.3.2. <i>Materiais Rochosos.....</i>	<i>6</i>
2.3.3. <i>Geossintéticos.....</i>	<i>7</i>
2.4. <i>AGENTES DE DEGRADAÇÃO .....</i>	<i>8</i>
2.5. <i>MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO.....</i>	<i>9</i>
2.5.1. <i>Abrasão.....</i>	<i>9</i>
2.5.2. <i>Desagregação por Crescimento de Cristais.....</i>	<i>10</i>
2.5.3. <i>Expansão Devido a Efeitos Térmicos.....</i>	<i>10</i>
2.5.4. <i>Faturamento por Alívio de Tensões .....</i>	<i>10</i>
2.5.5. <i>Hidrólise .....</i>	<i>11</i>
2.5.6. <i>Oxidação.....</i>	<i>11</i>
2.6. <i>METODOLOGIAS PARA AVALIAR A DURABILIDADE DE MATERIAIS     GEOTÉCNICOS .....</i>	<i>12</i>
2.7. <i>ENSAIOS DE DEGRADAÇÃO EM MATERIAIS GEOTÉCNICOS.....</i>	<i>16</i>
2.7.1. <i>Ensaio de Degradação no Campo.....</i>	<i>17</i>
2.7.1.1. <i>Exposição Natural no Campo .....</i>	<i>17</i>
2.7.1.2. <i>Exposição Acelerada no Campo.....</i>	<i>18</i>
2.7.2. <i>Ensaio de Degradação no Laboratório .....</i>	<i>19</i>

2.7.2.1. Exposição à Lixiviação Contínua.....	19
2.7.2.2. Ciclagem de Umedecimento e Secagem.....	23
2.7.2.3. Exposição à Condensação e Radiação Ultravioleta.....	25
2.7.2.4. Exposição à Estufa.....	28
2.7.2.5. Exposição à Névoa Salina.....	29
2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAL DE ESTUDO E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>32</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	32
3.2. MATERIAL DE ESTUDO.....	32
3.3. DEGRADAÇÃO DE AMOSTRAS DE GEOTÊXTIL NO LABORATÓRIO ...	34
3.3.1. Metodologia.....	34
3.3.2. Equipamento de Degradação.....	36
3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	51
3.4.1. Microscopia Ótica.....	53
3.4.2. Espectrometria Dispersiva de Raios-X (EDX).....	54
3.4.3. Resistência à Tração Não-Confinada.....	55
3.4.4. Resistência ao Puncionamento Estático.....	58
3.4.5. Determinação das Curvas dos Ensaios Mecânicos.....	60
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>64</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	64
4.2. MICROSCOPIA ÓTICA.....	64
4.3. ESPECTROMETRIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDX).....	66
4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NÃO-CONFINADA.....	68
4.4.1. Carga de Tração vs. Deformação.....	69
4.4.2. Parâmetros dos Materiais Degradados.....	70
4.4.3. Carga de Tração na Ruptura.....	73
4.4.4. Deformação na Ruptura.....	75
4.4.5. Efeito da Degradação na Rigidez.....	77
4.5. RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO ESTÁTICO.....	84
4.5.1. Curvas Força de Puncionamento vs. Penetração.....	84

4.5.2. Parâmetros dos Materiais Degradados .....	85
4.5.3. Força de Puncionamento na Ruptura.....	87
4.5.4. Penetração na Ruptura .....	89
4.6. <i>RELAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE DEGRADAÇÃO NO CAMPO E NO LABORATÓRIO</i> .....	90
4.7. <i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i> .....	95
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b> .....	<b>97</b>
5.1. <i>QUANTO AO EQUIPAMENTO DE DEGRADAÇÃO</i> .....	97
5.2. <i>QUANTO À METODOLOGIA UTILIZADA</i> .....	97
5.3. <i>QUANTO À MICROSCOPIA ÓTICA</i> .....	97
5.4. <i>QUANTO À ESPECTROMETRIA DISPERSIVA DE RAIOS-X</i> .....	98
5.5. <i>QUANTO À RESISTÊNCIA À TRAÇÃO</i> .....	98
5.6. <i>QUANTO À RESISTÊNCIA AO PUNCIONAMENTO</i> .....	99
5.7. <i>QUANTO À CORRELAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE DEGRADAÇÃO NO CAMPO E NO LABORATÓRIO</i> .....	99
5.8. <i>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</i> .....	99
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>101</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Classificação dos ensaios para avaliação da degradação. ....	12
Figura 2.2. Metodologia para avaliação da durabilidade (Maia <i>et al.</i> , 2003) . ....	15
Figura 2.3. Equipamento FSC - Concentrador natural de luz solar (ASTM, 1998).19	
Figura 2.4. Equipamento Soxhlet Convencional (Maia, 2001). ....	20
Figura 2.5. Equipamento Soxhlet de grandes dimensões da PUC-Rio (Maia, 2001). .....	22
Figura 2.6. Equipamento de condensação e exposição à radiação ultravioleta B. 26	
Figura 2.7. Equipamento de condensação e exposição à radiação ultravioleta por arco de xenônio (Matheus, 2002). ....	27
Figura 2.8. Câmara de exposição à nevoa salina. ....	30
Figura 3.1. Organograma ilustrativo da metodologia para avaliação da alterabilidade dos geotêxteis. ....	35
Figura 3.2. Amostras expostas com inclinação segundo a latitude local. ....	36
Figura 3.3. Esquema de funcionamento do equipamento de degradação. ....	38
Figura 3.4. Esquema do equipamento de degradação da UENF. ....	40
Figura 3.5. Variação da temperatura da água nos reservatórios A e B. ....	41
Figura 3.6. Variação da temperatura na câmara de degradação. ....	42
Figura 3.7. Painel dos controladores do equipamento de degradação. ....	44
Figura 3.8. Painel de comandos do equipamento de degradação. ....	45
Figura 3.9. Vista lateral direita do equipamento de degradação. ....	46
Figura 3.10. Vista lateral esquerda do equipamento de degradação. ....	47

Figura 3.11. Vista frontal do equipamento de degradação.	48
Figura 3.12. Detalhe da disposição dos aspersores dos sistemas de lixiviação no topo da câmara de degradação.	49
Figura 3.13. Detalhe do aspersor utilizado para lixiviação.	49
Figura 3.14. Detalhe do sistema de refrigeração do reservatório B e do regulador de nível d'água.	50
Figura 3.15. Detalhe do sistema de bombeamento (a) e dos registros de uma das bombas do sistema.	50
Figura 3.16. Porta amostras para ensaios no equipamento de degradação.	51
Figura 3.17. Procedimento de amostragem.	52
Figura 3.18. Estereoscópio, câmera fotográfica e fonte de iluminação utilizados na análise por microscopia ótica.	53
Figura 3.19. Equipamento de EDX pertencente ao LECIV - UENF.	54
Figura 3.20. Equipamento utilizado para ensaio de tração não-confinada.	55
Figura 3.21. Sistema de garras rígidas paralelas.	56
Figura 3.22. Corpo-de-prova para ensaio de tração não-confinada.	56
Figura 3.23. Rigidez secante a 2, 5 e 10% de deformação.	57
Figura 3.24. Rigidez secante a 50% da resistência à tração na ruptura.	58
Figura 3.25. Sistema de fixação para ensaio de puncionamento estático.	59
Figura 3.26. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de puncionamento estático.	60
Figura 3.27. Carga de tração vs. deformação em nove corpos-de-prova do Geotêxtil A, intacto (Cunha Pinto, 2006).	61
Figura 3.28. Carga de tração vs. deformação em cinco corpos-de-prova do Geotêxtil B, intacto (Cunha Pinto, 2006).	62
Figura 3.29. Curvas carga de tração vs. deformação dos Geotêxteis A e B intactos (Cunha Pinto, 2006).	62
Figura 4.1. Micrografias dos Geotêxteis A e B, intactos e degradados no equipamento implementado.	65

Figura 4.2. Variação da quantidade de óxidos lixiviados vs. óxidos residuais, Geotêxtil A.....	67
Figura 4.3. Variação da quantidade de óxidos lixiviados vs. óxidos residuais, Geotêxtil B.....	68
Figura 4.4. Carga de tração vs. deformação do Geotêxtil A, em diferentes níveis de degradação. ....	69
Figura 4.5. Curvas carga de tração vs. deformação do Geotêxtil B, em diferentes níveis de degradação. ....	70
Figura 4.6. Carga de tração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório do Geotêxtil A.....	74
Figura 4.7. Carga de tração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório do Geotêxtil B.....	75
Figura 4.8. Deformação na ruptura vs. tempo de degradação natural no campo e no laboratório para Geotêxtil A.....	76
Figura 4.9. Deformação na ruptura vs. tempo de degradação natural no campo e no laboratório para Geotêxtil B.....	77
Figura 4.10. Rigidez Secante a 2, 5 e 10% de deformação e a 50% de $T_f$ para diferentes níveis de degradação, Geotêxtil A.....	78
Figura 4.11. Rigidez Secante a 2, 5 e 10% de deformação e a 50% de $T_f$ para diferentes níveis de degradação, Geotêxtil B.....	78
Figura 4.12. Rigidez Secante a 2% de $\varepsilon$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.....	80
Figura 4.13. Rigidez Secante a 2% de $\varepsilon$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.....	80
Figura 4.14. Rigidez Secante a 5% de $\varepsilon$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.....	81
Figura 4.15. Rigidez Secante a 5% de $\varepsilon$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.....	81
Figura 4.16. Rigidez Secante a 10% de $\varepsilon$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.....	82

Figura 4.17. Rigidez Secante a 10% de $\varepsilon$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B. ....	82
Figura 4.18. Rigidez Secante a 50% de $T_f$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A. ....	83
Figura 4.19. Rigidez Secante a 50% de $T_f$ vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B. ....	83
Figura 4.20. Força de puncionamento vs. penetração para diferentes níveis de degradação no equipamento, Geotêxtil A. ....	84
Figura 4.21. Força de puncionamento vs. penetração para diferentes níveis de degradação no equipamento, Geotêxtil B. ....	85
Figura 4.22. Força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A. ....	87
Figura 4.23. Força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B. ....	88
Figura 4.24. Penetração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A. ....	89
Figura 4.25. Penetração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B. ....	90
Figura 4.26. Índice da força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A. ....	92
Figura 4.27. Índice da força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B. ....	92
Figura 4.28. Relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório para um mesmo valor do índice de degradação. ....	93
Figura 4.29. Relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório pelo índice de degradação da força de puncionamento na ruptura para diferentes procedimentos de degradação, Geotêxtil A. ....	94
Figura 4.30. Relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório pelo índice de degradação da força de puncionamento na ruptura para diferentes procedimentos de degradação, Geotêxtil B. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação dos materiais mais utilizados na construção civil. ....	5
Tabela 2.2. Casos da avaliação da degradação de materiais geotécnicos. ....	14
Tabela 2.3. Casos de degradação por exposição natural no campo. ....	18
Tabela 2.4. Casos de degradação por lixiviação contínua em equipamento Soxhlet. ....	21
Tabela 2.5. Casos de degradação de materiais geotécnicos através de ciclagem por umedecimento e secagem. ....	24
Tabela 2.6. Casos de degradação de materiais geotécnicos através de ciclos de condensação e radiação ultravioleta. ....	28
Tabela 2.7. Casos de degradação de materiais geotécnicos após exposição em estufa. ....	29
Tabela 3.1. Especificações técnicas do Geotêxtil B (Huesker, 2003). ....	33
Tabela 4.1. Quantidade de óxidos lixiviados e residuais no Geotêxtil A. ....	66
Tabela 4.2. Quantidade de óxidos lixiviados e residuais no Geotêxtil B. ....	66
Tabela 4.3. Variação da carga de tração e deformação na ruptura, Geotêxtil A. ...	71
Tabela 4.4. Resultados do ensaio de resistência à tração na ruptura, Geotêxtil B. ....	72
Tabela 4.5. Variação da rigidez quanto ao tipo e nível de degradação, Geotêxtil A. ....	72
Tabela 4.6. Variação da rigidez quanto ao tipo e nível de degradação, Geotêxtil B. ....	73
Tabela 4.7. Resultado do ensaio de puncionamento estático, Geotêxtil A. ....	86
Tabela 4.8. Resultado do ensaio de puncionamento estático, Geotêxtil B. ....	86

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Abreviações:

ABINT.....Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos.  
ABNT.....Associação Brasileira de Normas Técnicas.  
ASTM.....*American Society for Testing Materials*.  
DRX.....Difração de Raios-X.  
EDX.....Espectrometria Dispersiva de Raios-X.  
EN.....*Europäische Norm*.  
FSC.....*Fresnel Solar Concentrator*.  
IEN.....Instituto de Engenharia Nuclear.  
ISRM.....*International Society for Rock Mechanics*.  
MEV.....Microscopia Eletrônica de Varredura.

### Símbolos:

T..... Carga de tração  
T<sub>f</sub>..... Carga de tração na ruptura  
CV..... Coeficiente de variação  
ε..... Deformação  
ε<sub>f</sub>..... Deformação na ruptura  
L..... Espaçamento entre garras  
UV-A..... Faixa de radiação ultravioleta entre 400 e 315 nm  
UV-B..... Faixa de radiação ultravioleta entre 315 e 290 nm  
F<sub>P</sub>..... Força de punção  
F<sub>Pf</sub>..... Força de punção na ruptura  
F..... Força de tração aplicada  
B..... Largura do corpo-de-prova  
P..... Penetração  
P<sub>f</sub>..... Penetração na ruptura  
PA..... Poliamida  
PET..... Poliéster  
PE..... Polietileno  
PEAD..... Polietileno de Alta Densidade  
PP..... Polipropileno  
%..... Porcentagem  
PH..... Potencial hidrogeniônico  
α..... Raio alfa  
β..... Raio beta  
γ..... Raio gama  
J<sub>sec</sub>..... Rigidez secante  
UV..... Ultravioleta  
ΔL..... Variação do espaçamento entre garras

**Unidades:**

cm.....	Centímetro
°C.....	Grau centígrado
h.....	Hora
l.....	Litros
m.....	Metro
m <sup>2</sup> .....	Metro quadrado
mm.....	Milímetro
min.....	Minuto
nm.....	Nanômetro
N.....	Newton
kN.....	Quilo-Newton (10 <sup>3</sup> N)
KPa.....	Quilo-Pascal (10 <sup>3</sup> Pa)
s.....	Segundo
W.....	Watts

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O estudo da durabilidade de materiais de construção representa uma importante linha de pesquisa para a Construção Civil. Através do estudo da durabilidade é possível definir a vida útil e adequar a utilização dos materiais de construção em função das características intrínsecas e do meio ambiente exógeno.

Na construção, alguns materiais ficam expostos ao meio, e assim sujeitos a modificações de suas características pela exposição aos agentes de degradação, ficando mais susceptíveis a modificações de suas características pelos mecanismos de intempéries, comprometendo a solidez da obra. Entende-se por agentes de degradação o conjunto dos fatores que atuam para modificar as características físicas, químicas e mecânicas do material. Os principais agentes de degradação são de ordem climática, como por exemplo: temperatura, umidade do ar, precipitação atmosférica, vento, pressão atmosférica e outros.

Os agentes de degradação atuam nos materiais mobilizando diferentes mecanismos de degradação. Os principais mecanismos de degradação em materiais de construção são: a abrasão, a desagregação por crescimento de cristais, a expansão devido a efeitos térmicos, o fraturamento por alívio de tensões, a hidrólise e a oxidação.

Os mecanismos de degradação atuam de forma diferenciada nos materiais de construção, sendo mobilizados em função de suas características de durabilidade e da sua composição. Neste sentido, pode-se classificar os materiais de construção em 5 grupos: metálicos, não-metálicos, poliméricos, compósitos e fibras naturais.



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 e as cerâmicas. Dentre os materiais de construção empregados na Engenharia Geotécnica, os geossintéticos merecem destaque especial devido à sua crescente utilização em obras civis.

Levando-se em consideração que os projetos de engenharia são geralmente feitos para obras com vida útil bastante longa, surge a preocupação da continuidade da eficiência desses materiais com o passar do tempo, levantando-se questões quanto ao seu desempenho e durabilidade ao longo do tempo.

Deste modo, fazem-se necessários o aprimoramento de metodologias de avaliação da degradação e do desenvolvimento de equipamentos mais eficientes ao estudo da durabilidade de materiais de construção.

## **1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA**

Este trabalho visa a implementação de um equipamento de degradação de grandes dimensões capaz de submeter amostras de grandes volumes a diferentes processos e mecanismos de degradação de forma combinada.

O trabalho busca também a avaliação do comportamento de materiais geotêxteis em função aos processos de degradação. Para isto, faz-se a determinação da variação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, degradado de forma acelerada no laboratório, utilizando o equipamento implementado.

A avaliação da funcionalidade e representatividade dos processos de degradação simulados no equipamento implementado é feita através da comparação dos resultados obtidos com os apresentados por Cunha Pinto (2006). Destaca-se que Cunha Pinto (2006) estudou os mesmos materiais pesquisados no presente trabalho através de procedimentos de degradação natural no campo e acelerado no laboratório. No laboratório, foram utilizados os seguintes procedimentos de degradação acelerada: lixiviação contínua e ciclos de umedecimento e secagem.

### **1.3. ESCOPO DA PESQUISA**

A dissertação é composta de 5 capítulos, apresentando inicialmente, neste capítulo a introdução ao tema e os objetivos da pesquisa desenvolvida.

O Capítulo 2 apresenta a classificação dos materiais de construção e os agentes de degradação, além dos principais mecanismos e procedimentos de degradação observados nos materiais geotécnicos.

No Capítulo 3 são apresentadas as características do material de estudo, o equipamento de degradação implementado, a metodologia utilizada e o programa experimental desenvolvido. Ressalta-se que os ensaios mecânicos foram realizados utilizando a mesma metodologia proposta por Cunha Pinto (2006).

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados nos geotêxteis utilizados na pesquisa.

No Capítulo 5, dá-se o encerramento do trabalho com a apresentação das principais conclusões. São propostas também recomendações para pesquisas futuras.

## **CAPÍTULO 2 – DEGRADAÇÃO EM MATERIAIS GEOTÉCNICOS**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

O estudo da durabilidade dos materiais de construção é de extrema importância para a Construção Civil, pois possibilita um maior conhecimento da variação do comportamento das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais quando expostos aos agentes de degradação.

A literatura indica que degradações rápidas de materiais rochosos podem provocar até mesmo a ruptura de obras civis (Frazão & Caruso, 1983; Fookes *et al.*, 1988; Amorim *et al.*, 2001).

Neste capítulo, são feitas definições iniciais dos termos mais utilizados para caracterização das modificações sofridas pelos materiais no campo.

É apresentada a classificação dos materiais de construção, enfatizando os mais utilizados em obras geotécnicas e apresentando o comportamento destes materiais quando submetidos à degradação.

São descritos ainda, os agentes de degradação, além dos principais mecanismos e procedimentos de degradação dos materiais geotécnicos.

### **2.2. DEFINIÇÕES INICIAIS**

Na literatura técnica, o termo degradação pode ser considerado o mais difundido para designar as modificações sofridas pelos materiais geotécnicos devido à ação dos agentes do meio ambiente exógeno.

De maneira geral, a degradação manifesta-se através da redução da resistência mecânica devido à ação dos agentes físicos, químicos e biológicos (Farjallat, 1972).

Dentre os problemas construtivos provocados pela degradação, destacam-se a desagregação, a decomposição, a desintegração, e a oxidação, como os mais usuais.

A desagregação dos materiais corresponde à fragmentação e aumento de produção de finos, o que causa redução da resistência e desgaste no material. Pode-se definir a decomposição como a modificação química e mineralógica do material. Já a desintegração pode ser causada pela perda de coesão e individualização dos minerais constituintes. Finalmente, a oxidação ocorre quando existe a geração de óxidos.

O principal objetivo do estudo da degradação dos materiais é prever o comportamento dos materiais a longo prazo, para que seja possível definir sua vida útil, ou seja, sua durabilidade.

### 2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS

A literatura apresenta diversas classificações dos materiais de construção (Petrucci, 1999; Navarro, 2001; Callister, 2002). Estas classificações são elaboradas de acordo com o fim a que se destina, a forma de sua utilização ou material constituinte.

Considerando as características de durabilidade e a composição, pode-se classificar os materiais de construção em 5 grandes grupos como proposto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Classificação dos materiais mais utilizados na construção civil.

<b>Materiais de Construção</b>	
<i>Metálicos</i>	Metais
<i>Não Metálicos</i>	Materiais Cerâmicos
	Materiais Rochosos
	Vidro
<i>Poliméricos</i>	Geossintéticos
	Tintas
	Vernizes
<i>Compósitos</i>	Aglomerantes Naturais
	Argamassas
	Cimento-Amianto
	Materiais Betuminosos
<i>Fibras Naturais</i>	Madeira

Dentre os materiais da Tabela 2.1 destacam-se os materiais rochosos, os cerâmicos e os geossintéticos, devido à sua freqüente utilização em obras geotécnicas.

### **2.3.1. Materiais Cerâmicos**

A cerâmica é tradicionalmente definida como um material não metálico, inorgânico, constituído basicamente de materiais argilosos. Os materiais argilosos são unidades estruturais simples e se diferenciam uns dos outros pela diferente relação entre sílica e alumina, pela quantidade de água de constituição e pela sua estrutura (Petrucci, 1999).

A cerâmica, após calcinação sob altas temperaturas, apresenta-se inteira ou parcialmente cristalizada. A cristalização confere ao material cerâmico melhorias importantes em algumas propriedades, tais como: resistência ao ataque de produtos químicos, dureza, resistência à tração e à compressão (Maia *et al.*, 2003a).

Devido aos procedimentos de fabricação e às características da matéria-prima, os materiais cerâmicos podem ser afetados significativamente pelos agentes de degradação, o que ocasiona freqüentes problemas construtivos (Amorim *et al.*, 2001). As modificações das propriedades dos materiais de construção devido à degradação ocorrem de modo gradativo.

### **2.3.2. Materiais Rochosos**

As rochas são materiais essenciais na constituição da crosta terrestre, provenientes da solidificação do magma ou de lavas vulcânicas, ou da consolidação de depósitos sedimentares, tendo ou não sofrido transformações metamórficas.

Os materiais rochosos, antes de serem extraídos das jazidas ou pedreiras, apresentam-se num estado de degradação equilibrado com o meio. Este estado foi atingido num intervalo geológico de tempo, ou seja, de centenas a milhares de anos. Após extração e aplicação em uma obra, ocorre a mudança do meio. Assim,

a rocha passa a sofrer transformações buscando uma nova condição de equilíbrio (Salles & Maia, 2004).

A velocidade de degradação no novo meio depende da susceptibilidade da rocha à degradação. Deste modo, a velocidade de degradação da rocha vai depender das características do material, do meio externo e do tempo de exposição. Neste sentido, a rocha pode sofrer degradações em um intervalo de tempo que pode variar de milhares de anos a poucos meses.

O material rochoso pode sofrer degradação provocada por agentes físicos, químicos e biológicos que causam a desintegração, a desagregação, a decomposição e a oxidação das rochas e dos minerais, provocando mudanças, principalmente do ponto de vista geomecânico (Maia *et al.*, 2002).

A composição mineralógica, a textura e a estrutura dos materiais rochosos, aliadas a condicionantes geológicos, definem o grau de resistência destes materiais quando submetidos a condições ambientais adversas ou quando atacados por substâncias agressivas (Mesquita & Artur, 2005).

### **2.3.3. Geossintéticos**

Os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros e, em menor escala, por aditivos. Os principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos são: o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliéster (PET), o polietileno de alta densidade (PEAD) e a poliamida (PA). Os aditivos têm a função de introduzir melhorias no processo de fabricação ou modificar aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico (ABINT, 2004). Dentre os aditivos mais usados, podem-se citar: os plastificantes, os antioxidantes e os inibidores da ação ultravioleta (Callister, 2002).

Os plastificantes aumentam a flexibilidade do geossintético, podendo ser removidos por aquecimento. Os antioxidantes são incorporados ao polímero básico para minimizar os efeitos da oxidação, principalmente em ambientes ricos em ozônio. O mais comum dos antioxidantes é o negro-de-fumo. Além disso,

devem ser incorporados inibidores da ação ultravioleta nos geossintéticos para evitar a variação das propriedades do material quando exposto ao sol (ABINT, 2004).

Nas últimas décadas, os geossintéticos vêm desempenhando um papel fundamental substituindo ou aprimorando técnicas existentes, permitindo associações e combinações com solos e agregados, resultando em soluções mais rápidas, mais leves, mais confiáveis e mais econômicas (ABINT, 2004).

Em uma obra de engenharia, os geossintéticos podem exercer concomitantemente, uma ou mais funções. Dentre elas, pode-se citar: separação, reforço, proteção, drenagem, filtração, impermeabilização e controle de erosão superficial.

Os principais geossintéticos utilizados em obras geotécnicas são: geocompostos, geocélula, geogrelha, georrede, geotêxtil não-tecido agulhado, geotêxtil tecido, geomembrana, biomanta, geodreno e tela para gabião.

A velocidade da degradação dos geossintéticos é influenciada pelo polímero básico utilizado, pela quantidade e tipo de aditivos e por características físicas, como a gramatura do material.

#### **2.4. AGENTES DE DEGRADAÇÃO**

A degradação dos materiais geotécnicos é provocada por agentes intrínsecos e extrínsecos (Maia, 2001). Os agentes de degradação intrínsecos são relativos à natureza do material, isto é, às características físicas, químicas e mecânicas. Os agentes de degradação extrínsecos são relativos ao meio ambiente.

Os principais agentes de degradação dos materiais geotécnicos são (Maia, 2001 e Cunha Pinto, 2006):

- *Agentes físicos*: radiação solar e outras radiações (raios  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ), temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica e atrito mecânico (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.

## **2.5. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO**

Dependendo da forma com que os agentes de degradação atuam nos materiais, diferentes mecanismos de degradação são mobilizados.

Os mecanismos de degradação dependem do tipo de material e do meio ambiente de exposição. Para os materiais geotécnicos, os mecanismos de natureza física e química são os mais observados (Maia, 2001).

A degradação física pode ser caracterizada pela fragmentação dos materiais em virtude de agentes mecânicos, sem que ocorra variação química.

A degradação química provoca modificações na composição química do material. Esta degradação ocorre, preferencialmente, em meios úmidos.

Apesar dos agentes de degradação atuarem de forma distinta, no meio natural é freqüente a sobreposição dos efeitos e a interação entre os mecanismos físicos e químicos. Assim, espera-se que um mecanismo de degradação esteja associado a outro, acelerando a degradação do material.

Os principais mecanismos de degradação de natureza física e química em materiais geotécnicos são: abrasão, desagregação por crescimento de cristais, expansão devido a efeitos térmicos, fraturamento por alívio de tensões, hidrólise e oxidação.

### **2.5.1. Abrasão**

A abrasão é um mecanismo de natureza física que pode ser definido como o desgaste por atrito ou impacto entre partículas, ou, ainda, o desgaste decorrente da movimentação do solo ou da rocha (Maia, 2001).



### **2.5.2. Desagregação por Crescimento de Cristais**

A desagregação por crescimento de cristais é um mecanismo de natureza física. Este mecanismo pode ser observado em materiais geotécnicos como os materiais rochosos, os materiais cerâmicos e os geossintéticos.

O crescimento de cristais no interior do material pode ser provocado principalmente por três fatores: o congelamento da água, a cristalização de sais e as alterações químicas com expansão. Em alguns materiais, como os rochosos, a variação de volume, ocasionada pelo crescimento de cristais, gera tensões que podem causar o fraturamento (Maia, 2001).

### **2.5.3. Expansão Devido a Efeitos Térmicos**

A expansão devido a efeitos térmicos é um mecanismo de natureza física observado em diversos materiais. A variação da amplitude térmica diurna e noturna (variação sazonal) gera a expansão e a contração dos materiais.

De maneira geral, os materiais geotécnicos são heterogêneos. Quando estes materiais são submetidos a variações de temperatura, apresentam diferentes coeficientes de dilatação, causando a expansão e a contração dos materiais através da concentração de tensões, que pode gerar e propagar microfissuras e desagregar o material.

### **2.5.4. Fraturamento por Alívio de Tensões**

O fraturamento por alívio de tensões é um mecanismo de natureza física, geralmente observado em materiais rochosos. Pode ser causado pela descompressão de maciços rochosos devido a escavações subterrâneas, cortes de grandes taludes, erosão de extratos superficiais, e outros processos, provocando microfissuração e fraturas no material (Goodman, 1989).

### **2.5.5. Hidrólise**

A hidrólise é um mecanismo de degradação de natureza química, podendo ocorrer em diversos materiais geotécnicos. Consiste na ruptura das cadeias moleculares pela ação das moléculas de água, causando a expansão nos materiais e, conseqüentemente, a lixiviação dos elementos constituintes.

### **2.5.6. Oxidação**

A oxidação é um mecanismo de degradação de natureza química, causada pela formação de óxidos devido à presença de oxigênio no ambiente, podendo ocorrer em diversos materiais de construção.

De maneira geral, nos materiais rochosos e cerâmicos, observa-se a reação entre os elementos constituintes destes materiais com o oxigênio, formando óxidos e hidróxidos, que constituem elementos de fácil lixiviação (Maia, 2001).

Ressalta-se que os geossintéticos sofrem oxidação quando submetidos à ação da luz solar (Foto-oxidação) e da temperatura (Termo-oxidação) (Abramento, 1995). Neste caso, a formação de óxidos é influenciada pelas características geométricas e pelos aditivos e polímeros empregados no processo de fabricação do geossintético.

A foto-oxidação é um fenômeno superficial que atinge somente as fibras expostas, tornando-as quebradiças e com menor resistência (Pandolpho & Guimarães, 1995). Neste fenômeno, as características geométricas são mais importantes do que os aditivos e os polímeros utilizados (Abramento, 1995).

O efeito da termo-oxidação não está limitado à superfície do material. Portanto, a termo-oxidação é influenciada, principalmente, pelo polímero e aditivo empregado no processo de fabricação (Abramento, 1995 e Agnelli, 1999).

## 2.6. METODOLOGIAS PARA AVALIAR A DURABILIDADE DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS

A metodologia para avaliar a durabilidade de materiais geotécnicos deve ser escolhida em função do objetivo da pesquisa e do tipo de material que será estudado. Ressalta-se, então, a importância do conhecimento dos principais procedimentos de ensaio utilizados para a avaliação da degradação dos materiais. Neste sentido, propõe-se uma classificação dos principais ensaios utilizados para avaliar a degradação de materiais geotécnicos (Figura 2.1).

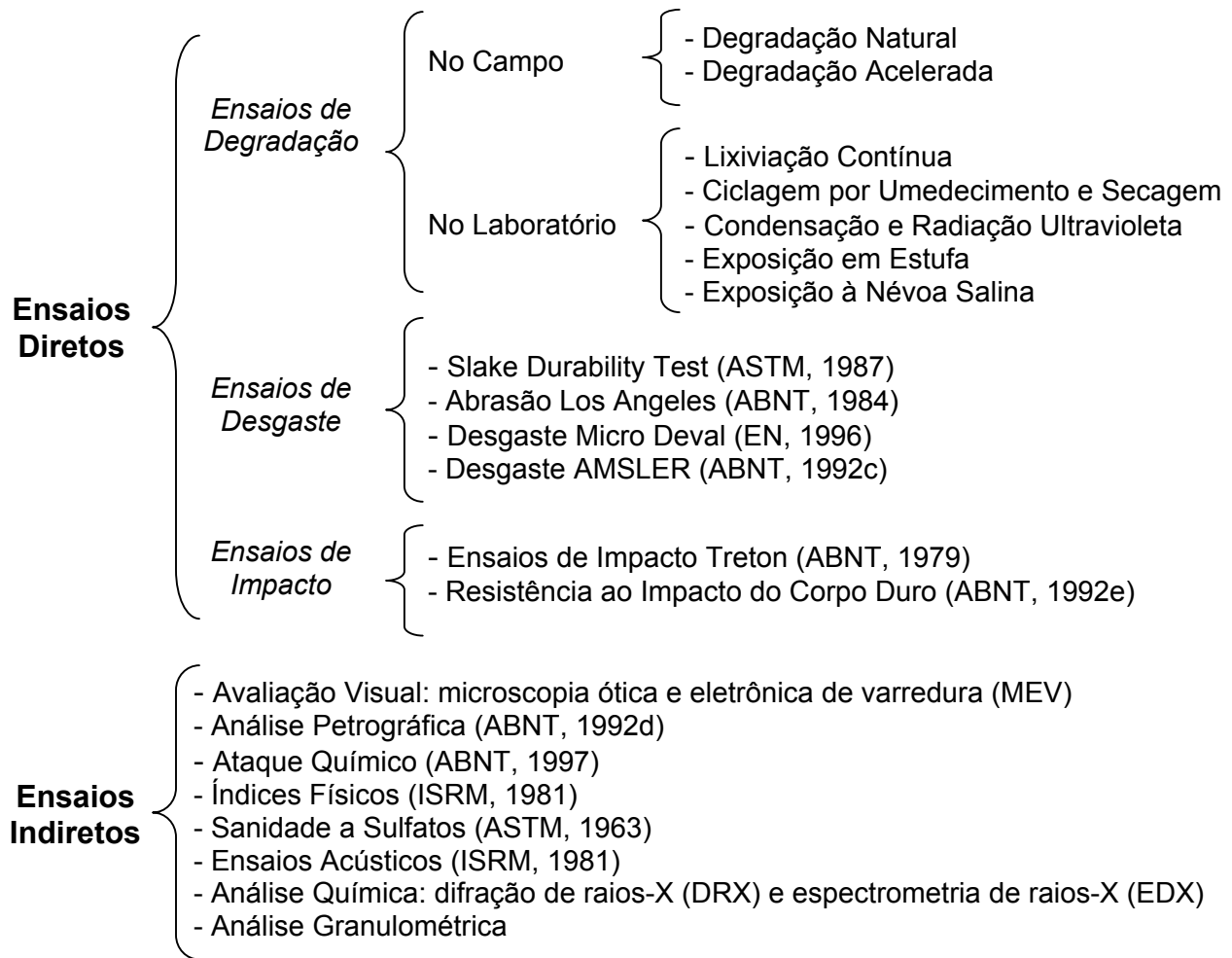


Figura 2.1. Classificação dos ensaios para avaliação da degradação.

Os procedimentos de ensaio para avaliação da degradação de materiais geotécnicos podem ser classificados em diretos e indiretos. Os procedimentos

diretos são utilizados para expor os materiais diretamente a diferentes mecanismos de degradação, buscando simular as condições ambientais do local de exposição do material. Pode-se dividir os procedimentos de degradação diretos em três categorias de ensaios: ensaios de degradação, ensaios de desgaste e ensaios de impacto.

O principal objetivo dos ensaios de degradação é submeter o material à exposição no campo e/ou no laboratório, para posterior determinação da variação das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material em diferentes níveis de degradação.

Os ensaios de desgaste e de impacto podem ser utilizados isoladamente, ou associados aos ensaios de degradação para avaliar o comportamento do material quanto à durabilidade.

Os procedimentos indiretos são utilizados para avaliar o nível de degradação dos materiais. Nestes procedimentos, os materiais não são submetidos à degradação. A avaliação da degradação é feita comparando parâmetros do material degradado com o material intacto. Os procedimentos mais utilizados são apresentados na Figura 2.1.

A Tabela 2.2 reúne alguns casos de avaliação da degradação em materiais geotécnicos através de procedimentos diretos, utilizando ensaios de desgaste e de impacto, e de procedimentos indiretos. Vale ressaltar que os ensaios de degradação merecem destaque especial devido à grande utilização em materiais geotécnicos. Estes ensaios serão descritos, posteriormente, de forma detalhada.

O comportamento de materiais geotécnicos quanto à durabilidade pode ser avaliado através de procedimentos diretos no laboratório baseados em metodologias encontradas na literatura. Diferentes metodologias para avaliação da durabilidade são propostas na literatura (Minette, 1982; Frazão, 1993; Maia, 2001; Pinheiro & Maia, 2004; Salles & Maia, 2004; Cunha Pinto, 2006). No entanto, uma metodologia generalizada pode ser representada pelo organograma mostrado na Figura 2.2.

Tabela 2.2. Casos da avaliação da degradação de materiais geotécnicos.

Referência	Material de Estudo	Procedimentos de Ensaio	Observação
Frazão & Caruso (1983)	Basaltos	Abrasão <i>Los Angeles</i> , Impacto Treton e Ensaio Acústicos	Redução da resistência com o aumento da degradação
Crosta (1998)	Rochas brandas	Ensaio acústico e <i>Slake Durability Test</i>	Ensaio satisfatório para o estudo da durabilidade
Maia (2001)	Basalto e Granito	Índices Físicos, Esclerometria, <i>Slake Durability Test</i> e Micro Deval	Ensaio adequado para a previsão do comportamento dos materiais
Dhakal <i>et al.</i> (2002)	Rochas Sedimentares	Análise Petrográfica e <i>Slake Durability Test</i>	Redução da resistência do material com o aumento do tempo de degradação
Maia <i>et al.</i> (2003b)	Cerâmica Vermelha	<i>Slake Durability Test</i>	Resultados adequados para a previsão do desgaste a longo prazo
Salles & Maia (2004)	Gnaisses	Índices Físicos	Os valores da absorção aumentam com o nível de degradação.
Barroso <i>et al.</i> (2005)	Gnaisse	Ensaio Acústico e Esclerometria	O material rochoso exposto há quase 100 anos encontra-se ainda pouco alterado
Becerra & Costa (2005)	Granitos	Análise Petrográfica e Ataque Químico	Alterações cromáticas, perda de brilho e danos texturais
Koppe <i>et al.</i> (2005)	Granitos	Análise Petrográfica e Índices Físicos	Oxidação dos materiais, além do aumento de fissuras.
Matos & Rocha (2005)	Mármore Camboriu	Índices Físicos	O material apresentou baixos índices de alteração.
Mattos <i>et al.</i> (2005)	Granitos	Análise Petrográfica e Ataque Químico	Materiais resistentes às alterações, devido aos ataques químicos
Mesquita & Artur (2005)	Granitos	Ataque Químico	Granitos resistentes a alterações provocadas por ataque químico
Philipp & Benedetti (2005)	Mármore dolomítico	Abrasão AMSLER e Resistência ao Impacto do Corpo Duro	Elevado desgaste, perda de brilho e formação de superfície rugosa
Renner & Pulz (2005)	Granitos	Análise Petrográfica, Índices Físicos, Ensaio Acústico, Impacto do Corpo Duro e Abrasão AMSLER	Excelente utilização dos materiais em estruturas, pisos e revestimentos
Silva & Costa (2005)	Esteatitos	Análise Petrográfica, Índices Físicos e Ataque Químico	Alterações de cor, formação de cavidades e perda de brilho, tornando a superfície áspera e esbranquiçada
Torquato <i>et al.</i> (2005)	Granitos	Ataque Químico	Alterações físicas nos materiais
Cunha Pinto (2006)	Geotêxteis	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	A estrutura física do material é afetada pela degradação.

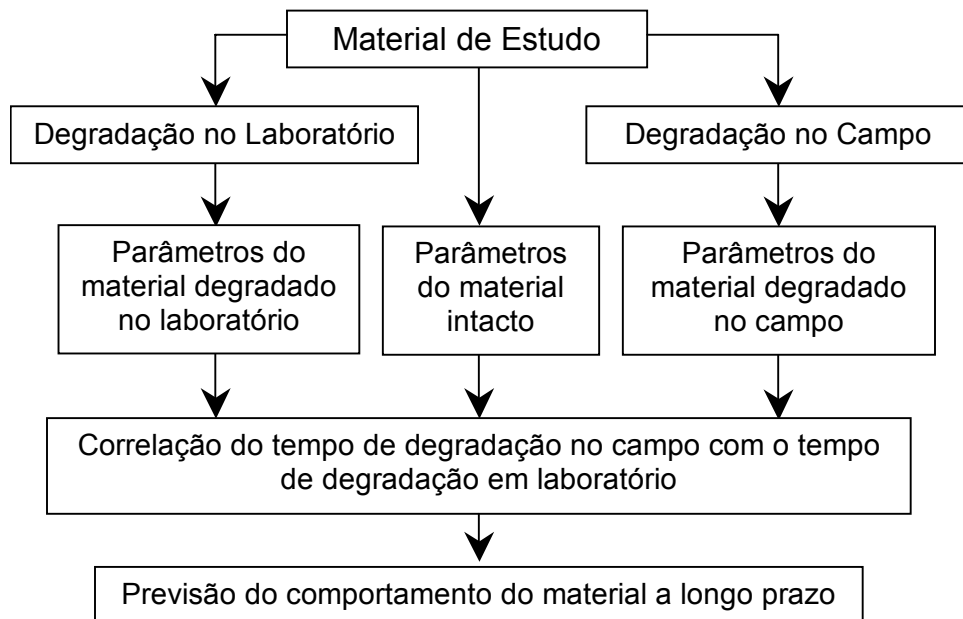


Figura 2.2. Metodologia para avaliação da durabilidade (Maia *et al.*, 2003) .

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;
- obtenção dos parâmetros que caracterizam o comportamento destes materiais;
- análise dos resultados para previsão do comportamento do material a longo prazo.

Na obtenção do material de estudo para avaliação da durabilidade podem-se considerar dois grupos de materiais: um, relativo a obras recentes ou em andamento e outro, relativo a obras antigas (Maia, 2001).

No primeiro grupo, existe a disponibilidade do material intacto, mas não do material degradado naturalmente. Em tal caso, podem-se produzir amostras com degradação natural, através da exposição do material aos agentes atmosféricos.

Todavia, o tempo necessário para produção de amostras representativas da degradação natural pode inviabilizar a análise.

No segundo grupo, existe a disponibilidade do material degradado naturalmente, mas, em geral, não se dispõe do material intacto usado na fase de construção. Assim, deve-se procurar um material intacto semelhante ao utilizado na fase de construção da obra.

Para a previsão do comportamento do material a longo prazo, visando uma estimativa da durabilidade, faz-se necessária uma extrapolação de resultados experimentais, obtidos em amostras com degradação acelerada no laboratório. No entanto, as condições de degradação induzida no laboratório não são idênticas às condições naturais de campo.

Para a previsão da durabilidade de materiais geotécnicos sujeitos à degradação natural, deve-se, inicialmente, simular esta degradação no laboratório. Tal simulação deve ser acelerada, permitindo o estudo em um tempo considerado viável. Deve, também, procurar simular os mesmos mecanismos de degradação que o material sofre no campo. Na previsão, determina-se o tempo de degradação acelerada, no qual a amostra degradada no laboratório passa a apresentar um comportamento similar ao da amostra degradada naturalmente no campo.

Assim, conhecida a relação entre o tempo de degradação no laboratório e o tempo de degradação natural, pode-se prever, por extrapolação ou interpolação, o tempo necessário de degradação no laboratório para um tempo de degradação natural desejado. Vale lembrar que o comportamento do material pode ser avaliado por diferentes parâmetros, obtidos a partir de diferentes ensaios (Minette, 1982).

## **2.7. ENSAIOS DE DEGRADAÇÃO EM MATERIAIS GEOTÉCNICOS**

A seguir são apresentados os principais ensaios de degradação no campo e no laboratório utilizados para avaliar o comportamento de materiais geotécnicos quanto à durabilidade.

### **2.7.1. Ensaios de Degradação no Campo**

A degradação de materiais geotécnicos no campo é empregada em estudos a longo prazo, que visam a obtenção de informações sobre os efeitos da degradação em um determinado material. A degradação dos materiais no campo tem a vantagem de expor o material diretamente às condições encontradas no meio. Vale ressaltar que a degradação no campo é influenciada pelas características climáticas do local de exposição, ou seja, o comportamento do material quanto à degradação varia em função da temperatura, umidade relativa, vento, pressão atmosférica e outros fatores.

A degradação dos materiais de construção no campo pode ser feita de duas maneiras: através da exposição natural ou da degradação acelerada.

#### **2.7.1.1. Exposição Natural no Campo**

A avaliação da durabilidade dos materiais aos agentes intempéricos pode ser feita através da exposição das amostras ao ar livre para que estas recebam incidência de luz solar e de variações climáticas, como chuvas, ventos e mudanças de temperatura (ABINT, 2004).

Esse tipo de degradação é empregada em estudos de longo prazo. Apresenta a vantagem de expor diretamente as amostras às condições encontradas no campo, embora seja necessária a realização de ensaios em diferentes localidades para abranger todas as possíveis variações climáticas (Cunha Pinto, 2006).

A escolha do local e as condições de exposição dos materiais são de extrema importância. De maneira geral, as amostras devem ser colocadas em locais onde existe a máxima incidência de luz solar ao longo do ano, e que possibilitem total circulação de ar e exposição às precipitações atmosféricas.

Não é freqüente a observação de procedimentos padronizados de ensaios de exposição às condições naturais no campo. No entanto, destaque pode ser dado ao procedimento de exposição de geotêxteis no campo (ASTM, 1996).



A Tabela 2.3 apresenta alguns trabalhos realizados para avaliação da degradação natural de materiais geotécnicos no campo.

Tabela 2.3. Casos de degradação por exposição natural no campo.

Referência	Material de Estudo	Tempo de Exposição
Frazão & Caruso (1983)	Basaltos Ilha Solteira	17 meses
	Basalto Rosana	4 meses
Ladeira & Minette (1984)	Diorito	11 meses
Cazzufi <i>et al.</i> (1995)	Geossintéticos	24 meses
Pandolpho & Guimarães (1995)	Geotêxteis	24 meses
Comer <i>et al.</i> (1998)	Geomembranas	26 meses
Koerner <i>et al.</i> (1998)	Geotêxteis	20 meses
Maia <i>et al.</i> (2003a)	Cerâmica Vermelha	12 meses
Maia <i>et al.</i> (2003b)	Cerâmica Vermelha	1 mês
Suits & Hsuan (2003)	Geotêxtil	18 meses
Salles & Maia (2004)	Gnaisses	11 meses
Cunha Pinto (2006)	Geotêxtil	14 meses

#### 2.7.1.2. Exposição Acelerada no Campo

A degradação acelerada do material no campo pode ser feita através de um equipamento especial, como por exemplo, o concentrador natural de luz solar FSC (*Fresnel Solar Concentrator*) (ASTM, 1998). O equipamento utiliza 10 espelhos altamente reflexivos, fornecendo à amostra uma intensidade de aproximadamente oito vezes a radiação solar natural (Figura 2.3). O equipamento acompanha o sol e exhibe as amostras para o espectro inteiro da luz solar todo o dia. A exposição consiste de ciclos de 60 minutos de umedecimento e secagem (52 minutos de secagem, seguidos de 8 minutos de jato de água). Quando o equipamento está desligado, são acionados jatos de água três vezes com duração de três minutos.

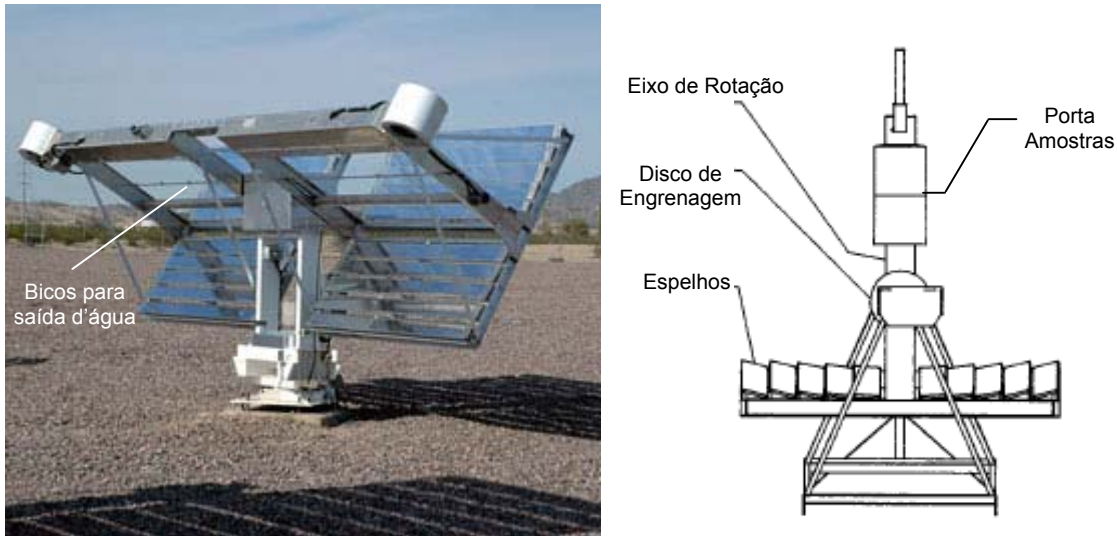


Figura 2.3. Equipamento FSC - Concentrador natural de luz solar (ASTM, 1998).

## 2.7.2. Ensaios de Degradação no Laboratório

### 2.7.2.1. Exposição à Lixiviação Contínua

O ensaio de lixiviação contínua simula a condição de alteração provocada pelo processo de carreamento dos elementos constituintes dos materiais.

O equipamento mais utilizado para ensaios de lixiviação contínua é o extrator Soxhlet. O equipamento Soxhlet convencional permite submeter amostras de pequenos volumes 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 2.4). Dentro do balão, coloca-se a solução de lixiviação, que pode ser monitorada e, se necessário, trocada 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 (Farjallat, 1972).

No tubo extrator, a amostra é submetida a três diferentes condições de degradação. 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. 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.

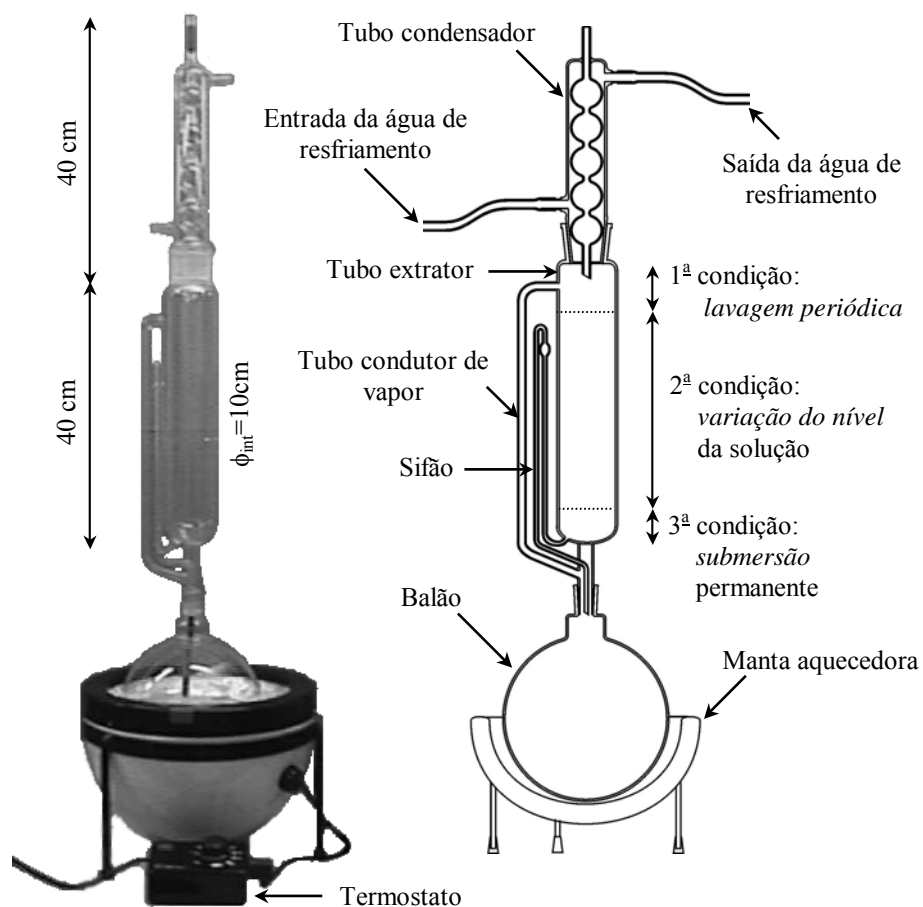


Figura 2.4. Equipamento Soxhlet Convencional (Maia, 2001).

A segunda condição de degradação 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 são semelhantes. 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. A Tabela 2.4 apresenta alguns casos de degradação de materiais geotécnicos por lixiviação contínua.

Tabela 2.4. Casos de degradação por lixiviação contínua em equipamento Soxhlet.

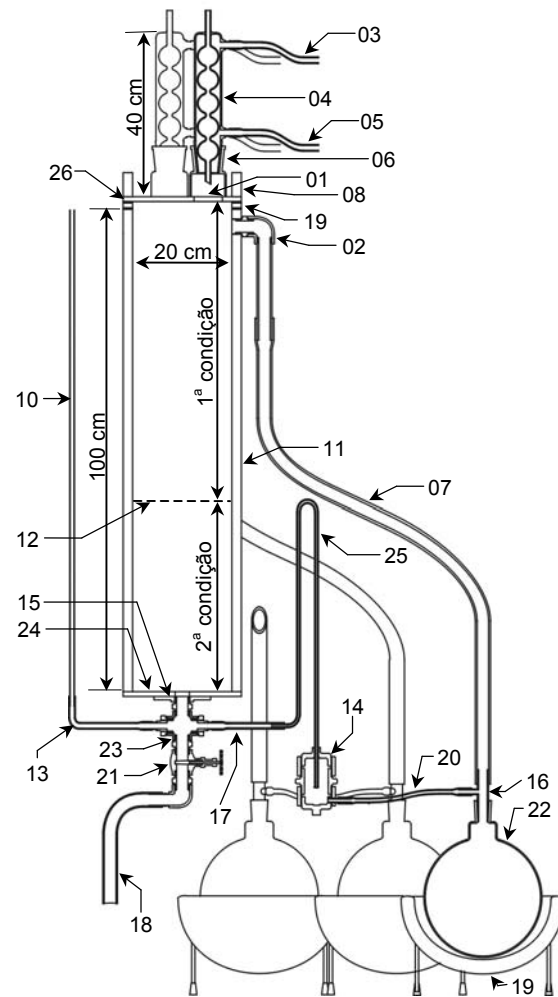
<b>Referência</b>	<b>Material</b>	<b>Observação</b>
Farjallat (1971)	Basalto	Perdas de massa com o aumento do tempo de degradação
Maia (2001)	Basalto e Granito	Ensaio adequado para a previsão a longo prazo do comportamento dos materiais
Pinheiro & Maia (2004)	Cerâmica Vermelha	São necessários estudos mais refinados para a avaliação da degradação destes materiais
Salles & Maia (2004)	Gnaisses	Redução da resistência à flexão dos materiais com o aumento da degradação
Matos & Rocha (2005)	Mármore	O material apresentou baixos índices de degradação.
Cunha Pinto (2006)	Geotêxtil	O ensaio de lixiviação contínua simula satisfatoriamente a degradação no campo

O equipamento convencional é capaz de promover a degradação apenas em amostras com pequeno volume. No entanto, existe um o equipamento Soxhlet de grandes dimensões capaz de submeter amostras de grandes volumes à degradação (Figura 2.5) (Maia, 2001).

Este equipamento segue o princípio de funcionamento dos equipamentos Soxhlet convencionais. Constitui-se, basicamente, de um conjunto de três mantas, três balões, um tubo extrator e três condensadores. O equipamento é capaz de ensaiar uma amostra de material rochoso granular com aproximadamente 600N ( $\cong$  60kgf).



(a)



(b)

**Legenda:**

- 01 - Orifício para saída de vapor
- 02 - Entrada do tubo condutor de vapor
- 03 - Saída da água de resfriamento
- 04 - Tubo condensador
- 05 - Entrada da água de resfriamento
- 06 - Conexão de vidro do condensador
- 07 - Tubo condutor de vapor
- 08 - Anel de PVC-PBA
- 09 - Manta aquecedora
- 10 - Tubo de vidro
- 11 - Tubo extrator
- 12 - Nível de rebaixamento

- 13 - Mangueira de borracha
- 14 - Trifurcador
- 15 - Mangueira p/ retorno
- 16 - Conexão de vidro
- 17 - Mangueira de borracha
- 18 - Descarga de fundo
- 19 - Complemento
- 20 - Conexão
- 21 - Registro
- 22 - Balão
- 23 - Conexão
- 24 - Fundo
- 25 - Sifão
- 26 - Tampa

Figura 2.5. Equipamento Soxhlet de grandes dimensões da PUC-Rio (Maia, 2001).

Além dos equipamentos Soxhlet, existe ainda o equipamento intemperizador (Hypolito & Valarelli, 1972). Este equipamento foi utilizado tradicionalmente para avaliar a degradação de agregados utilizados em concreto.

O intemperizador utiliza parâmetros experimentais que tendem simular as condições climáticas comparáveis a do clima tropical úmido, com alternância sazonal característica.

### **2.7.2.2. Ciclagem de Umedecimento e Secagem**

O ensaio de ciclagem de umedecimento e secagem simula a condição de degradação provocada pelas variações sazonais de umidade e temperatura no campo. Os resultados indicados na literatura mostram que o ensaio pode ser representativo das condições de degradação no campo (Minette, 1982).

Existem algumas variações do ensaio de ciclagem por umedecimento e secagem com relação à solução que é utilizada para imersão dos materiais, podem-se citar os ensaios de ciclagem por:

- *Umedecimento em água e secagem em estufa;*
- *Umedecimento em etilenoglicol e secagem em estufa;*
- *Umedecimento em sulfato de sódio ou magnésio e secagem em estufa.*

O ensaio de ciclagem mais comum é o de umedecimento em água natural ou destilada seguido de secagem ao ar ou em estufa (ABNT, 1992a). O tempo necessário para o umedecimento e para a secagem depende do tipo do material, podendo ser previamente definido através das curvas de variação da umidade com o tempo, obtidas a partir de ensaios de absorção e de secagem (Frazão, 1993). As curvas possibilitam a definição dos tempos mínimos de umedecimento e de secagem que melhor representem os estados saturado e seco do material.

No ensaio de ciclagem acelerada com etilenoglicol (ABNT, 1992b), as amostras são imersas de forma que as partículas sejam cobertas pelo etilenoglicol com 1cm acima de seu topo. Após a imersão, as amostras devem ser levadas à estufa para secar até a constância de peso. Em seguida, as amostras são resfriadas durante  $60 \pm 5$  min, completando assim um ciclo. Os três primeiros ciclos devem ter o tempo de imersão com duração de  $48 \pm 1$  h. Os ciclos seguintes devem ter duração de  $72 \pm 1$  h. O ensaio deve ser encerrado quando a intensidade do ataque for tal que, ao final de qualquer ciclo, nenhuma partícula fique retida na peneira com malha de

abertura nominal igual a 19mm (Santiago *et al.*, 2004). Este ensaio é pouco recomendado por exagerar demasiadamente as condições ambientais (Frazão & Caruso, 1983).

O ensaio de umedecimento em sulfato de sódio ou magnésio e secagem em estufa é utilizado quando se deseja simular condições dos materiais quando submetidos ao congelamento-degelo ou a cristalização de sais (Frazão & Caruso, 1983).

A Tabela 2.5. apresenta alguns casos de degradação de materiais geotécnicos através da ciclagem de umedecimento e secagem.

Tabela 2.5. Casos de degradação de materiais geotécnicos através de ciclagem por umedecimento e secagem.

<b>Referência</b>	<b>Material</b>	<b>Tipo de Ensaio</b>	<b>Observação</b>
Farjallat <i>et al.</i> (1972)	Basaltos	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Procedimento razoável para prever a durabilidade de rochas
Frazão & Caruso (1983)	Basaltos	Umedecimento em Água Destilada, em Etilenoglicol e em Sulfato de Sódio e Secagem	Os ensaios que usavam imersão com sulfato de sódio mostraram-se mais enérgicos
Maia (2001)	Basalto	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Os materiais são influenciados pelo procedimento de ensaio
Maia <i>et al.</i> (2003b)	Cerâmica Vermelha	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Procedimentos adequados para a análise qualitativa da durabilidade.
Pinheiro & Maia (2004)	Cerâmica Vermelha	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	São necessários estudos mais refinados para a avaliação da degradação
Santiago <i>et al.</i> (2004)	Filito	Umedecimento em Água Destilada e em Etilenoglicol e Secagem	Redução da resistência do com o aumento do tempo de degradação
Koppe <i>et al.</i> (2005)	Granitos	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Oxidação dos materiais, além do aumento de fissuras.
Matos & Rocha (2005)	Mármore Camboriú	Umedecimento em Sulfato de Sódio e Secagem	O material apresentou baixos índices de degradação
Cunha Pinto (2006)	Geotêxtil Tecido	Umedecimento em Água Destilada e Secagem	Alteração nas propriedades mecânicas das amostras.

### 2.7.2.3. Exposição à Condensação e Radiação Ultravioleta

O ensaio de condensação e radiação ultravioleta simula a condição de alteração provocada pela exposição do material a raios solares e variações sazonais de umidade. No ensaio, as amostras são submetidas a ciclos de condensação e de exposição à radiação ultravioleta, ambos sob temperatura controlada.

A degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta pode ser feita utilizando luz fluorescente A ou B (ASTM, 2004b).

A literatura mostra que o comprimento de onda igual a 400 nm é o limite superior para radiação ultravioleta 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 A e B, pois define o ponto no qual a energia ultravioleta começa a causar vários efeitos e mudanças de pigmentação da pele humana (Agnelli, 1999).

Ressalta-se que, o material geotécnico que sofre maior influência da radiação ultravioleta são os geossintéticos. Neste sentido, sabe-se que a radiação ultravioleta A causa alguns danos nestes materiais, enquanto a radiação ultravioleta B causa severos danos.

Existe ainda, o procedimento de degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta que utiliza arco de xenônio (ASTM, 2002 e ASTM, 2004a).

A Figura 2.6 apresenta um tipo de equipamento de degradação por condensação e exposição à radiação ultravioleta que é freqüentemente utilizado. A Figura 2.6b apresenta o esquema de um equipamento de radiação ultravioleta que utiliza luz fluorescente B. O equipamento possui dois bancos de radiação ultravioleta com quatro fontes de radiação em cada um, num total de oito fontes de luz. Esses bancos são colocados no sentido longitudinal do aparelho onde estão localizados os porta amostras que comportam um total de 51 corpos-de-prova com dimensões iguais a 75mm de largura e 150mm de comprimento.



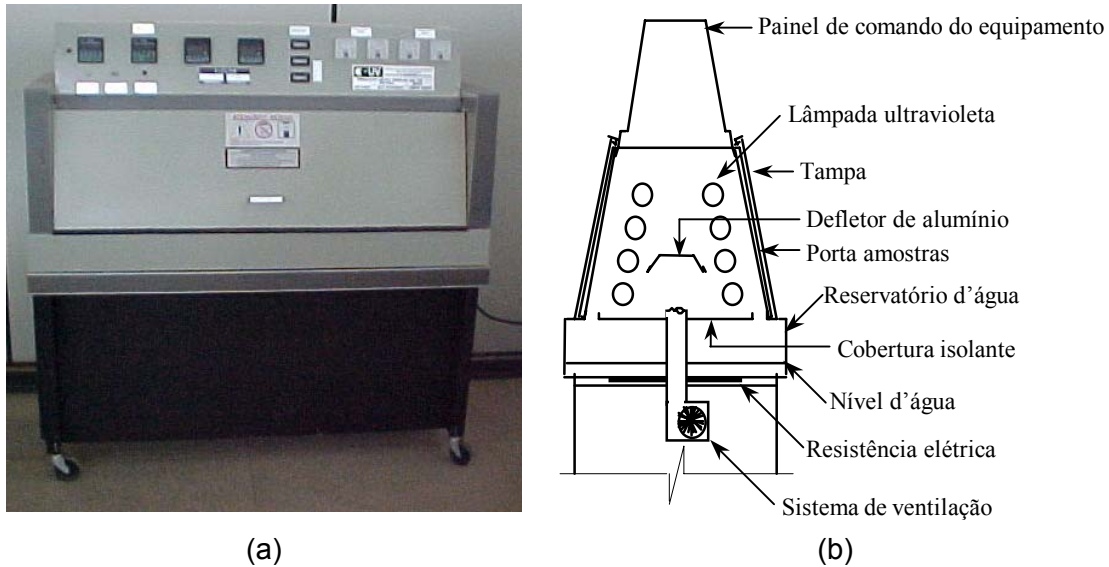


Figura 2.6. Equipamento de condensação e exposição à radiação ultravioleta B.

Durante a exposição à radiação ultravioleta a temperatura no interior da câmara de teste é mantida constante através de um sistema de ventilação (Figura 2.6.b). Um defletor de alumínio distribui o ar na câmara de testes e uma cobertura isola e evita que o ar aquecido entre em contato com a água localizada no reservatório d'água. O equipamento possui um temporizador de resfriamento que é ativado quando passa do ciclo de radiação ultravioleta para o ciclo de condensação, com duração de 2 a 5 minutos.

No ciclo de condensação, a água é aquecida por uma resistência blindada, sob o reservatório d'água. O vapor d'água enche a câmara de teste até atingir 100% de umidade relativa. O vapor continuamente se condensa sobre as amostras voltando em seguida para o reservatório.

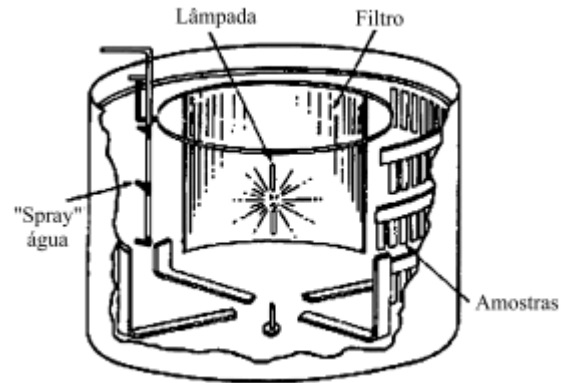
Ressalta-se que as fontes de luz do equipamento de condensação e radiação UV B são semelhantes fisicamente a uma lâmpada fluorescente comum de 40W de potência. Para obtenção da radiação ultravioleta, as fontes de luz do equipamento são revestidas por um tipo de fósforo que emite a radiação especificada.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

A temperatura e o tempo de duração de cada ciclo são controlados através do painel de comando do equipamento.

A Figura 2.7 apresenta o equipamento do tipo Weather-Ometer que opera com arco de xenônio.



(a)



(b)

Figura 2.7. Equipamento de condensação e exposição à radiação ultravioleta por arco de xenônio (Matheus, 2002).

O equipamento possui uma lâmpada central de 6500 W, posicionada no centro de rotação de um carrossel que armazena as amostras a serem submetidas aos ciclos de radiação e umidade, conforme esquematizado na Figura 2.7b. O número de ciclos, tempo de duração, temperatura da câmara e umidade ambiente são controlados e monitorados pelo operador, por meio de controles e monitores externos.

No equipamento, cada ciclo corresponde a dois processos de degradação. No primeiro processo, as amostras são submetidas somente a radiação ultravioleta, e no segundo processo, as amostras são submetidas à radiação ultravioleta simultaneamente a chuveiramento de água.

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.

A literatura mostra alguns casos de degradação acelerada por condensação e radiação ultravioleta (Tabela 2.6).

Tabela 2.6. Casos de degradação de materiais geotécnicos através de ciclos de condensação e radiação ultravioleta.

Referência	Material	Tipo de Ensaio	Observação
Cazzufi <i>et al.</i> (1995)	Geossintéticos	Condensação e radiação UV B	Redução nas propriedades mecânicas.
Comer <i>et al.</i> (1998)	Geomembranas	Condensação e radiação UV	Redução de 40% da resistência à tração.
Koerner <i>et al.</i> (1998)	Geotêxteis	Condensação e radiação UV A e arco de xenônio	A degradação utilizando radiação UV A é menos intensa do que a que utiliza arco de xenônio
Matheus (2002)	Geotêxteis e Geomembranas	Condensação e radiação arco de xenônio	Não houve mudanças significativas na resistência e rigidez à tração.
Maia <i>et al.</i> (2003a)	Cerâmica vermelha	Condensação e radiação UV B	A degradação no laboratório foi similar à degradação no campo, porém mais intensa que a natural.
Valinho <i>et al.</i> (2004)	Geossintéticos	Condensação e radiação UV B	A degradação foi influenciada pelos aditivos usados.
Cunha Pinto (2006)	Geotêxteis	Condensação e radiação UV B	Redução da resistência do material.

#### 2.7.2.4. Exposição à Estufa

A exposição de materiais em estufa é utilizada para avaliar a resistência à oxidação dos materiais, particularmente os geossintéticos.

No ensaio, as amostras são inseridas em estufa a temperatura e tempo pré-definidos, para que posteriormente seja verificado, através de ensaios de resistência, a variação das características e comportamento dos materiais.

A temperatura do ensaio não deve ser maior que a temperatura de transição vítrea do polímero utilizado no geossintético, pois a temperatura de transição vítrea é a temperatura a partir da qual as regiões amorfas deste material cristalino readquirem gradualmente sua mobilidade (Matheus, 2002).

Ressalta-se que se os resultados preliminares de resistência não apresentarem mudanças nas características e comportamento dos materiais, a temperatura poderá ser acrescida em até 50°C acima da temperatura de transição vítrea do material.

Durante o ensaio, devem ser monitoradas as características físicas do material, como variação de cor, brilho e gramatura do material.

A Tabela 2.7 apresenta alguns casos de materiais que foram submetidos à degradação em estufa.

### 2.7.2.5. Exposição à Névoa Salina

A classificação do ambiente atmosférico está baseada na localização geográfica e nos poluentes atmosféricos associados entre si que contribuem para suas relativas corrosividades. Portanto, um ambiente marinho é caracterizado pela proximidade em relação ao oceano e, conseqüentemente, pela maresia que pode produzir danos severos de corrosão em materiais variados, acelerando a deterioração dos sistemas de revestimentos que têm como função básica proteção, e no caso específico de rochas ornamentais, função estética (Lima *et al*, 2005).

Tabela 2.7. Casos de degradação de materiais geotécnicos após exposição em estufa.

Referência	Material	Observação
Fayoux <i>et al.</i> (1993)	Geomembranas	A temperatura causou evaporação dos plastificantes
Montanelli & Rimoldi (1995)	Geogrelhas	Não houve variação nas propriedades mecânicas
Hsuan & Guan (1998)	Geomembranas	As propriedades de tração na ruptura mantiveram-se inalteradas
Elias <i>et al.</i> (1999)	Geogrelhas	Não ocorreu degradação mecânica dos materiais
Vink & Fontijn (2000)	Geotêxteis	O tipo de material influencia na velocidade de oxidação
Matheus (2002)	Geotêxteis e Geomembranas	As geomembranas não apresentaram mudanças significativas e os geotêxteis apresentaram redução de resistência e rigidez para elevados níveis e temperatura de degradação
Lodi & Bueno (2004)	Geomembranas	Pequenas variações nas propriedades físicas e mecânicas

Existe ainda, a degradação de rochas usadas em enrocamentos de quebra-mares e diques. Neste caso, deve-se considerar também a degradação provocada pelo

efeito das ondas que desgastam progressivamente os contatos entre partículas e provocam a deformação do material. A Figura 2.8 apresenta um modelo de câmara salina.



Figura 2.8. Câmara de exposição à nevoa salina.

No ensaio de exposição à névoa salina, os corpos-de-prova devem ser dispostos na câmara de maneira que não haja contato entre eles, permitindo livre acesso da solução a todos os corpos-de-prova. Deve-se ainda garantir que a solução escorrida de um corpo-de-prova não goteje sobre os outros. A temperatura deve ser mantida em  $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , a pressão de ar comprimido entre 70 e 170KPa e a solução de ensaio a 5% de cloreto de sódio com pH entre 6,5 e 7,2 (ABNT, 1983).

Dentro da câmara de teste, a solução salina é borrifada usando o princípio de injeção através de um bico pulverizador localizado no topo da câmara. Vale ressaltar que o bico pulverizador deve ser posicionado de forma que o jato de solução não atinja diretamente os corpos-de-prova.

O ar comprimido requerido é aquecido dentro de um umidificador pressurizado e saturado com a mistura antes de ser inserido no interior da câmara. O nível no tanque de solução salina é verificado através de um reservatório que é abastecido constantemente.

O aquecimento no interior da câmara garante um condicionamento uniforme da temperatura para o valor ajustado. A condensação gerada é drenada constantemente através de uma abertura no piso da câmara e a atmosfera corrosiva é exaurida através de uma abertura apropriada.

Após o ensaio, os corpos-de-prova devem ser lavados em água corrente à temperatura inferior à 40°C, a fim de eliminar os depósitos de sal da superfície e devem ser imediatamente secos.

Lima *et al.* (2005) submeteram três amostras de rochas graníticas à exposição em câmara salina durante 1080 horas. O ensaio acelerado em câmara salina ocasionou o aumento de fissuras, permitindo fácil acesso da solução salina aos minerais constituintes das rochas, causando degradação dos materiais de estudo.

## **2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentados os principais mecanismos de degradação em materiais rochosos, cerâmicos e geossintéticos, além do detalhamento dos procedimentos mais utilizados para degradação de materiais geotécnicos.

Considerando que os materiais de construção sofrem degradação após sua exposição ao meio ambiente, o estudo da durabilidade constitui-se um aspecto relevante em projetos e em obras existentes. Vale ressaltar que os efeitos da degradação nos materiais dependem de suas características intrínsecas e das características extrínsecas do local de sua aplicação e tempo de exposição.

Assim, qualquer estudo de durabilidade deve se basear em metodologias específicas para o problema e sempre procurar simular a degradação natural através do principal mecanismo de degradação esperado no campo.

O objetivo final do estudo da durabilidade é a avaliação das condições de utilização do material a longo prazo. Para tanto, é fundamental a simulação da degradação do material no laboratório. Tal simulação deve ser rápida e deve reproduzir, da melhor forma, as condições de degradação no campo.

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAL DE ESTUDO E PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1. INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta o funcionamento e os detalhes construtivos do equipamento de degradação de grandes dimensões implementado. Ressalta-se que o equipamento é capaz de submeter amostras de grandes volumes à exposição em diferentes processos de degradação, mobilizando assim, diversos mecanismos de degradação.

É apresentado o critério utilizado para seleção do material de estudo, além de suas características quanto à resistência mecânica e deformabilidade.

Este capítulo apresenta, ainda, a metodologia empregada para avaliar a degradação do material de estudo no laboratório e os procedimentos de ensaio utilizados no programa experimental.

### **3.2. MATERIAL DE ESTUDO**

O material de estudo foi escolhido em função da necessidade de se avaliar o desempenho do equipamento de degradação. Para isto, foram adotados os seguintes critérios para seleção do material de estudo:

- i. Homogeneidade: procurou-se obter um material cujo nível de heterogeneidade não interferisse nos procedimentos de degradação;
- ii. Caracterização: o material selecionado deveria possuir suas características já definidas;
- iii. Degradação: o material deveria ter resultados de ensaios de degradação no campo e no laboratório por outros procedimentos;
- iv. Quantidade: o material deveria ter quantidade suficiente para obtenção de amostras com diferentes intensidades de degradação no equipamento desenvolvido.

- v. Volume: o volume total das amostras deveria ser compatível com o volume disponível para ensaio no equipamento.

Baseado nos critérios de seleção, o material utilizado na presente pesquisa foi o geotêxtil tecido HATE/6G/240/AS, produzido a partir de laminetes de polipropileno.

O material de estudo foi cedido pela Huesker Ltda., empresa especializada em produção de geossintéticos e foi objeto de estudo da dissertação de mestrado de Cunha Pinto (2006). Na pesquisa, Cunha Pinto (2006) utilizou diferentes procedimentos de degradação no laboratório para a previsão de comportamento a longo prazo. Os procedimentos de degradação no laboratório utilizados por Cunha Pinto (2006) foram: lixiviação contínua, ciclagem por umedecimento e secagem e condensação e exposição à radiação ultravioleta B.

O material de estudo é constituído de dois Geotêxteis com quantidades diferentes de aditivos antioxidantes. O Geotêxtil A, produzido especialmente para a pesquisa de Cunha Pinto (2006) possui cerca do dobro da quantidade de aditivos antioxidantes que o Geotêxtil B, que é o Geotêxtil comercializado. A Tabela 3.1. apresenta as especificações referentes ao Geotêxtil B fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1. Especificações técnicas do Geotêxtil B (Huesker, 2003).

Resistência à tração (ABNT 12824)	Longitudinal	$\geq 55 \text{KN/m}$
	Transversal	$\geq 55 \text{KN/m}$
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 m

Os valores de resistência à tração e deformação apresentados na Tabela 3.1, do Geotêxtil B solicitado na direção transversal e longitudinal, nota-se que o material apresenta um comportamento isotrópico.

Ressalta-se que as especificações técnicas do Geotêxtil A não foram fornecidas pelo fabricante, devido a este material não ser um produto padrão da indústria.



Estes geotêxteis podem ser utilizados em obras de controle de erosão em margens de lagos e rios, em drenagem subterrânea, em revestimento de reservatórios, em controle de erosão em taludes, na construção de barragens, canais e reservatórios, desempenhando a maior variedade de funções, tais como: separação, filtração, drenagem, proteção, contenção e reforço (Huesker, 2003).

### **3.3. DEGRADAÇÃO DE AMOSTRAS DE GEOTÊXTIL**

A seguir é apresentada a metodologia utilizada para avaliar a degradação de amostras de geotêxteis. É descrito de forma detalhada o equipamento de degradação implementado com o objetivo de submeter amostras de grandes dimensões à degradação em diferentes mecanismos e processos de degradação de forma combinada.

#### **3.3.1. Metodologia**

Para a avaliação da degradação de geotêxtil tecido foi adotada a metodologia proposta por Maia (2001), aplicada no estudo da alterabilidade de materiais de enrocamento e Cunha Pinto (2006), aplicada para o estudo da degradação de geotêxteis, ilustrada no organograma mostrado na Figura 3.1.

Fundamentalmente, esta metodologia de estudo faz a comparação dos parâmetros do geotêxtil submetido a três diferentes condições: intacta, degradada naturalmente no campo e degradada de forma acelerada no laboratório. Nesta metodologia, uma parte do material intacto foi destinada para ensaios de degradação acelerada no laboratório. Posteriormente, foram medidos os parâmetros do material em diferentes níveis de degradação no laboratório.

Na presente pesquisa, faz-se somente a degradação do material em um equipamento de degradação implementado para simular diferentes processos de degradação no laboratório, além da determinação dos parâmetros dos materiais degradados. Através da comparação das variações dos parâmetros dos materiais degradados no equipamento implementado e nos outros procedimentos de

degradação em laboratório, faz-se a avaliação da representatividade e eficiência do equipamento na simulação da degradação que o material sofre no campo.

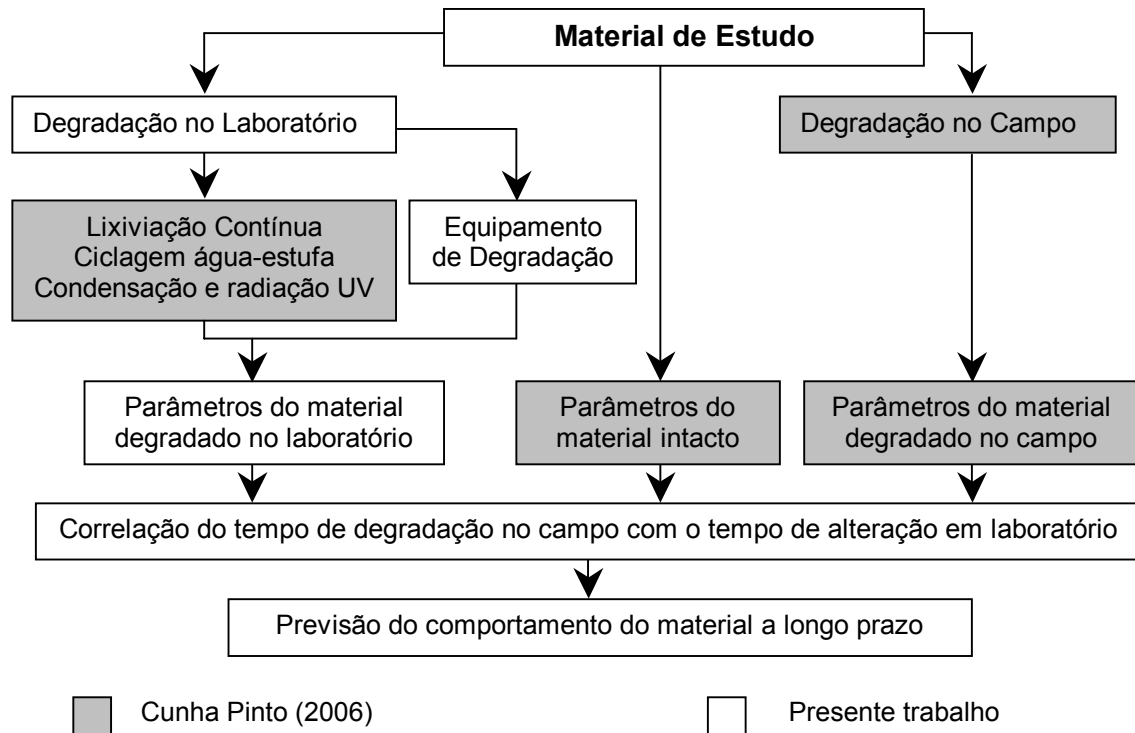


Figura 3.1. Organograma ilustrativo da metodologia para avaliação da alterabilidade dos geotêxteis.

Através desta comparação, faz-se também a determinação da correlação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório.

Ressalta-se que a degradação no campo foi realizada por Cunha Pinto (2006). As amostras foram expostas 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 (Figura 3.2).

Esse tipo de degradação é empregada em estudos de comportamento do material a longo prazo, que visam a obtenção de informações sobre os efeitos da degradação. 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.



Figura 3.2. Amostras expostas com inclinação segundo a latitude local.

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 à  $21^{\circ}45'$  em relação à horizontal, que corresponde à latitude local, localizado no telhado do edifício do CCT na UENF (Figura 3.2).

### **3.3.2. Equipamento de Degradação**

Para a previsão do comportamento do material a longo prazo, visando uma estimativa da durabilidade, faz-se necessária uma extrapolação de resultados experimentais, obtidos a partir de ensaios em amostras com degradação induzida de forma acelerada no laboratório. No entanto, as condições de degradação no laboratório não são idênticas às condições de campo. Todavia, alguns procedimentos de degradação no laboratório podem ser representativos das condições de degradação no campo. Destaca-se que um dos ensaios mais representativos das condições de degradação natural é, provavelmente, o ensaio de lixiviação contínua (Maia, 2001a e Cunha Pinto, 2006).

Neste sentido, foi implementado um equipamento de degradação de grandes dimensões, com o objetivo de degradar de forma acelerada amostras de material

com grandes volumes, tornando possível simular da maneira mais representativa as condições de degradação no campo.

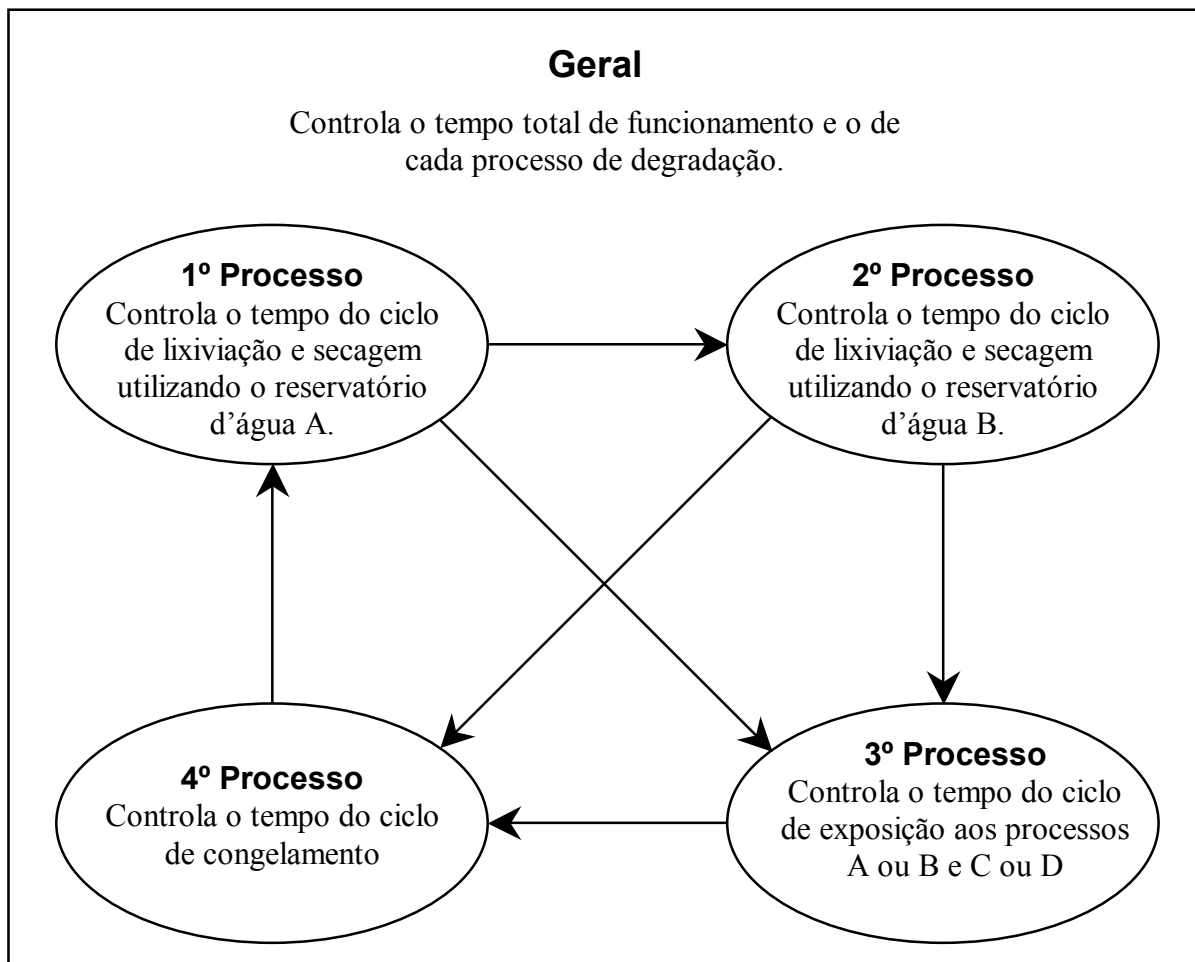
No equipamento, as amostras são submetidas à variação de temperatura e umidade através de dois processos de lixiviação com água destilada e posterior secagem parcial. São considerados dois níveis de temperatura da água de lixiviação que são escolhidos de acordo com o gradiente de temperatura desejado.

Destaca-se ainda que o projeto final do equipamento de degradação prevê a implementação de mais dois processos de degradação: exposição à radiação ultravioleta e congelamento.

Apresenta-se a seguir uma descrição do funcionamento do equipamento e, posteriormente, mostram-se detalhes construtivos.

A Figura 3.3 apresenta um esquema de funcionamento do equipamento de degradação.

O equipamento possui um controlador geral que está ligado aos quatro processos de degradação. Estes quatro processos de degradação podem ser usados separadamente, ou em conjunto, seguindo a simulação de degradação desejada, mas sempre na seqüência do 1º ao 4º processo de degradação. Ressalta-se que o 3º e 4º processos ainda não foram implementados.



A – Sistema de lixiviação do reservatório d'água A  
 B – Sistema de lixiviação do reservatório d'água B  
 C – Radiação Ultravioleta  
 D – Ventilação

Figura 3.3. Esquema de funcionamento do equipamento de degradação.

A exposição do material no 3º processo de degradação poderá ser utilizado de quatro maneiras:

- i. Exposição à lixiviação utilizando reservatório A e radiação ultravioleta;
- ii. Exposição à lixiviação utilizando reservatório B e radiação ultravioleta;
- iii. Exposição à lixiviação utilizando reservatório A e ventilação;
- iv. Exposição à lixiviação utilizando reservatório B e ventilação.

A Figura 3.4 mostra um esquema do equipamento de degradação desenvolvido no laboratório da UENF. O equipamento é constituído, basicamente, por uma câmara

de degradação, dois sistemas independentes de lixiviação e um sistema de controle.

Cada sistema de lixiviação possui um reservatório inferior d'água com temperaturas diferentes e controladas por sistemas de bombeamento independentes.

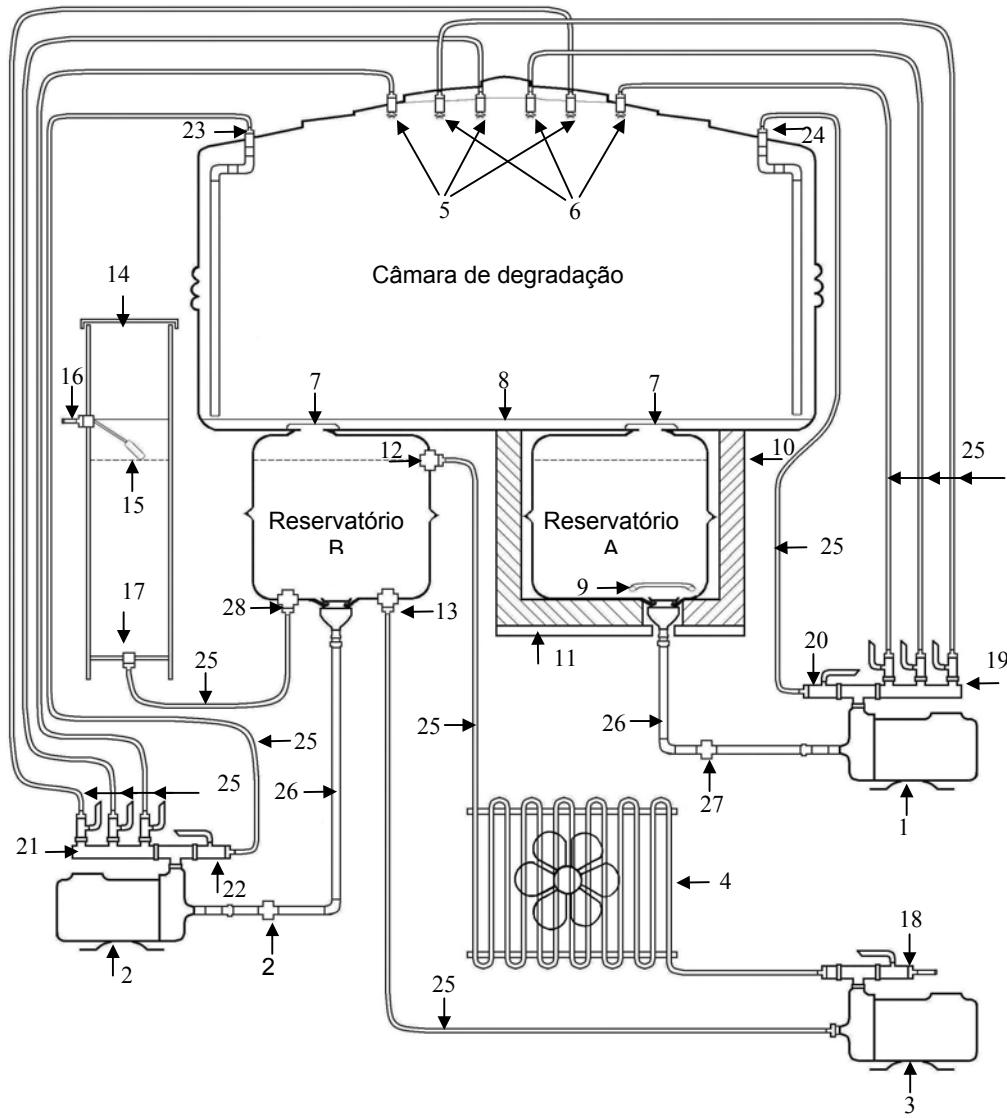
A lixiviação das amostras é feita por meio de circulação d'água dos reservatórios inferiores para a câmara de degradação através de bombas centrífugas localizadas na parte inferior dos reservatórios d'água, que lançam a água de lixiviação para conjuntos de aspersores, localizados no topo da câmara de degradação.

Existem dois conjuntos de aspersores, um para cada sistema de lixiviação. Os aspersores provocam a lavagem homogênea e contínua sem concentração de jatos d'água nas amostras. O retorno da água para o reservatório é feito por gravidade.

O controle de temperatura dentro dos reservatórios tem o objetivo de provocar gradientes térmicos enquanto as amostras são lixiviadas. Para isto, existem diferentes mecanismos de controle de temperatura.

- i. Reservatório A: a água é aquecida até a temperatura desejada, com temperatura máxima da ordem de 90°C, através de resistência blindada localizada no interior do reservatório;
- ii. Reservatório B: a água é mantida com temperatura próxima da ambiente, através de um sistema de refrigeração. O sistema de refrigeração faz a circulação d'água através de um radiador. A eficiência do sistema de refrigeração depende da temperatura ambiente e da temperatura inicial da água de lixiviação na câmara.

As temperaturas dos reservatórios A e B são monitoradas por sensores imersos nos reservatórios. Os sensores estão conectados ao sistema de controle.



Legenda:

- |  |   |
|--|---|
| (1) Bomba do sistema de lixiviação do reservatório A;                  | (14) Nível d'água no reservatório B durante o funcionamento da bomba;                     |
| (2) Bomba do sistema de lixiviação do reservatório B;                  | (15) Entrada d'água no nível regulador;   |
| (3) Bomba do radiador;   | (16) Flange para saída de água destilada do nível regulador de vazão para reservatório B; |
| Radiador;  | (17) Bomba do radiador;   |
| (4) Conjunto de aspersores do sistema de lixiviação do reservatório B; | (18) Três registros para saída d'água dos aspersores da bomba 1;                          |
| (5) Conjunto de aspersores do sistema de lixiviação do reservatório A; | (19) Registro da bomba 1;   |
| (6) Tela de proteção dos reservatórios A e B;                          | (20) Três registros para saída d'água dos aspersores da bomba 2;                          |
| (7) Nível d'água no interior da câmara de degradação;                  | (21) Registro da bomba 2;   |
| (8) Resistência blindada;  | (22) Descarga de fundo da bomba 2;  |
| (9) Alvenaria para isolamento do reservatório A;                       | (23) Descarga de fundo da bomba 1;  |
| (10) Suporte de madeira para alvenaria;                                | (24) Mangueira de silicone com diâmetro de 1/2";  |
| (11) Entrada d'água do radiador;                                       | (25) Tubo de PVC;   |
| (12) Saída d'água do reservatório B para bomba;                        | (26) União para tubo PVC;   |
| (13) Nível regulador;  |   |

Figura 3.4. Esquema do equipamento de degradação da UENF.

A Figura 3.4. mostra a variação da temperatura nos reservatórios A e B durante quatro horas de funcionamento do equipamento.

O 1º Processo de degradação corresponde à lixiviação e secagem parcial utilizando a água do reservatório A e o 2º Processo de degradação corresponde à lixiviação e secagem parcial utilizando a água do reservatório B. Nesta pesquisa, foi ajustado o tempo de duração de cada processo igual a uma hora, sendo alternados 15 minutos de lixiviação e 15 minutos de secagem parcial.

Da Figura 3.5, observa-se que a temperatura da água no reservatório A varia de 62 a 72°C e a temperatura do reservatório B varia de 35 a 40°C. Ressalta-se que foi utilizada a temperatura máxima igual a 75°C e mínima igual a 35°C, para os reservatórios A e B, respectivamente.

A Figura 3.6 apresenta a variação de temperatura no centro da câmara de degradação. Observa-se que a temperatura variou de 39 a 63°C, o que corresponde a um gradiente de temperatura de aproximadamente 25°C.

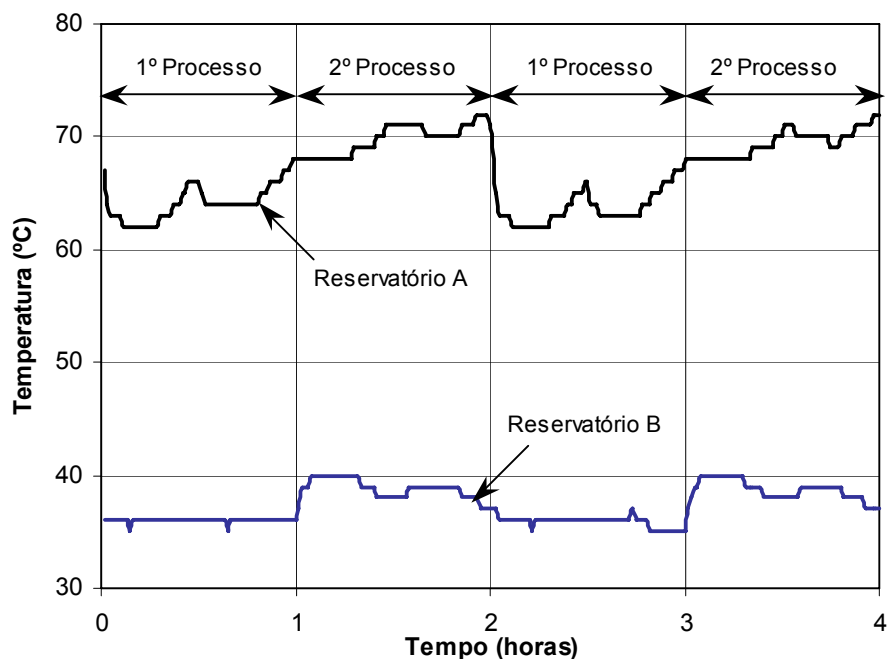


Figura 3.5. Variação da temperatura da água nos reservatórios A e B.



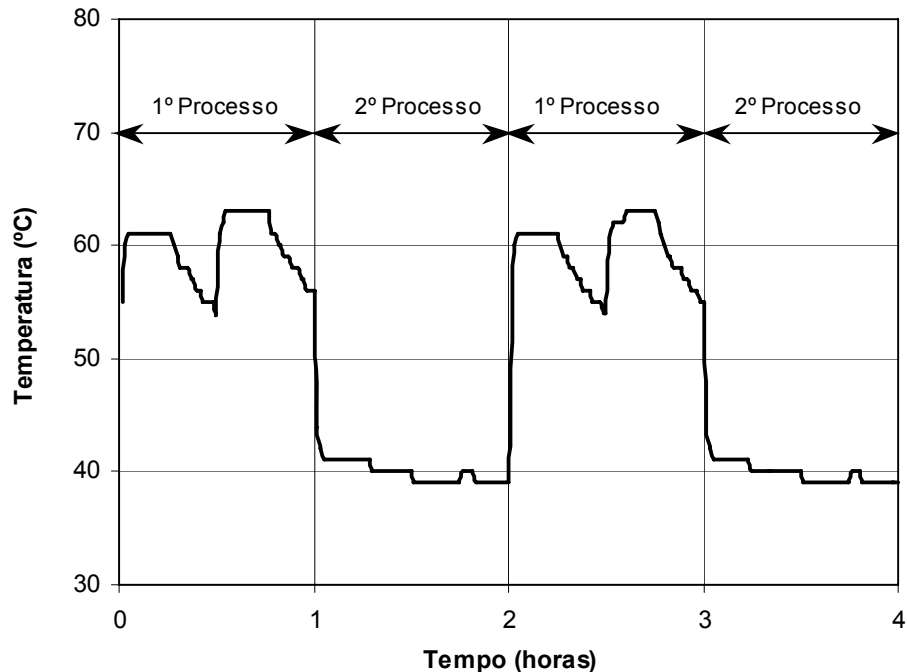


Figura 3.6. Variação da temperatura na câmara de degradação.

O abastecimento de água no equipamento é feito por um destilador d'água. A água destilada entra no equipamento através de uma bóia reguladora de nível, que determina o nível d'água no interior do reservatório B.

O nível d'água máximo dentro da câmara do equipamento ocorre quando após o funcionamento de um dos sistemas de lixiviação, toda a água da câmara de degradação retorna para o respectivo reservatório d'água.

O nível d'água mínimo é aquele que não provoca a cavitação dos sistemas de bombeamento.

A determinação do nível adequado é feita experimentalmente e sempre buscando o maior volume d'água para cada reservatório. Isto é feito da seguinte forma:

- i. Coloca-se o regulador de nível em uma altura arbitrada;
- ii. Liga-se a bomba do sistema de lixiviação do reservatório B até que o nível d'água dentro do reservatório e do controlador de nível d'água se estabilizem. Neste momento, não deve ocorrer a cavitação da bomba;

- iii. Desliga-se a bomba do sistema de lixiviação do reservatório B e espera-se o retorno d'água para o reservatório;
- iv. Deve-se garantir que, neste momento, o reservatório A esteja completamente cheio, mas não necessariamente o reservatório B. A câmara de degradação deverá estar sem água no fundo;
- v. Liga-se a bomba do sistema de lixiviação do reservatório A até que o nível d'água dentro do reservatório e do nível regulador se estabilizem. Neste momento, não deve ocorrer cavitação da bomba;
- vi. Desliga-se a bomba do sistema de lixiviação do reservatório A e espera-se o retorno d'água para os reservatórios;
- vii. Após a estabilização do nível d'água nos reservatórios e no controlador de nível d'água, caso não se observe a presença de água no fundo da câmara, o nível d'água arbitrado é satisfatório;
- viii. Repete-se este procedimento até obter o maior volume de água nos reservatórios inferiores.

O sistema de controle é automático e feito através de dois painéis: o painel dos controladores (Figura 3.7) e o painel dos comandos (Figura 3.8).

No primeiro, encontram-se controladores digitais que permitem a programação do tempo de cada função do equipamento de degradação (Figura 3.7).

A Figura 3.8 apresenta o painel de comandos do equipamento de degradação. Neste painel encontram-se:

- i. Chave geral que liga e desliga o equipamento;
- ii. Horímetro que mostra o tempo total de funcionamento do equipamento;
- iii. Termômetros para monitoração da temperatura da água nos reservatórios A e B e para a temperatura no interior da câmara de degradação;
- iv. Chaves teste para cada função do equipamento, permitindo o teste de cada sistema independentemente;
- v. Chaves de controle para os quatro ciclos de degradação que ativam os ciclos desejados.



Figura 3.7. Painel dos controladores do equipamento de degradação.



Figura 3.8. Painel de comandos do equipamento de degradação.

A Figura 3.9 apresenta a vista lateral direita do equipamento de degradação. Pode-se observar o nível regulador d'água e as bombas 1 e 2, e do sistema de refrigeração.

A Figura 3.10 mostra a vista lateral direita do equipamento de degradação. Nota-se o sistema de refrigeração e os reservatórios A e B.



Figura 3.9. Vista lateral direita do equipamento de degradação.

Das Figuras 3.9 e 3.10, nota-se que a câmara de degradação é um recipiente em aço inoxidável com 1,10m de diâmetro por 0,60m de altura. No topo da câmara de degradação há uma abertura por onde as amostras são inseridas para o ensaio. Os reservatórios A e B foram feitos em aço inoxidável e possuem altura e largura iguais a 30cm e comprimento igual a 55cm, correspondendo a um volume igual a 49,5 litros cada. Vale ressaltar que o reservatório A foi revestido com alvenaria refratária proporcionando melhor isolamento térmico (Figura 3.10).



Figura 3.10. Vista lateral esquerda do equipamento de degradação.

A Figura 3.11 apresenta uma vista frontal do equipamento de degradação, onde estão situados os painéis do sistema de controle.

Foram colocados três aspersores para lixiviação das amostras, em cada sistema de lixiviação. Para que as amostras fossem lavadas de forma homogênea, os aspersores foram dispostos simetricamente e de forma intercalada (Figura 3.12).

Os aspersores foram conectados ao sistema de bombeamento através de mangueira de silicone com diâmetro nominal igual a 12,8mm.



A Figura 3.13 mostra um detalhe do aspersor utilizado e de sua fixação no topo da câmara de degradação. Os aspersores foram fabricados de latão com diâmetro de 12,8mm. Observa-se que os aspersores foram fixados perpendicularmente ao topo da câmara de degradação. A saída de água na extremidade inferior do aspersor está a aproximadamente 10cm do topo da câmara de degradação.



Figura 3.11. Vista frontal do equipamento de degradação.



Figura 3.12. Detalhe da disposição dos aspersores dos sistemas de lixiviação no topo da câmara de degradação.



Figura 3.13. Detalhe do aspersor utilizado para lixiviação.

A Figura 3.14a apresenta o sistema de refrigeração do reservatório B. O sistema de refrigeração é composto por um exaustor e um sistema constituído por tubos de aço inoxidável com diâmetro de 0,25 polegadas, conectados entre si através de mangueira de silicone com retorno da água para o reservatório B e uma entrada da água vinda da bomba do sistema de refrigeração.

A Figura 3.14b apresenta um detalhe do nível regulador d'água. O nível regulador é constituído por um tubo com diâmetro igual a 15cm e altura igual a 80cm, com uma entrada de água destilada em sua lateral na parte superior. Na entrada,



existe uma bóia que determina o nível d'água de funcionamento do equipamento de degradação. A saída de água destilada para o reservatório B encontra-se na parte inferior do nível.



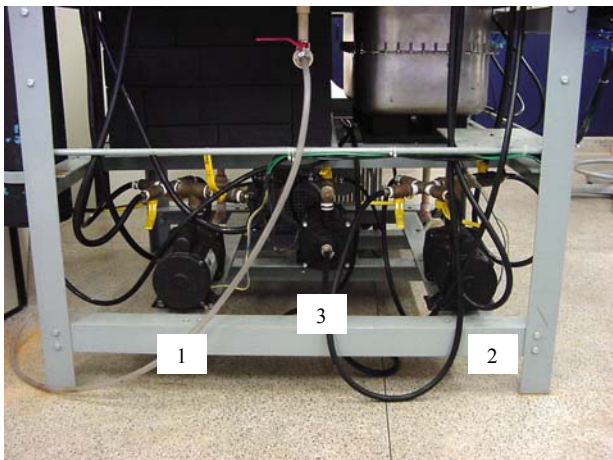
(a) Sistema de refrigeração



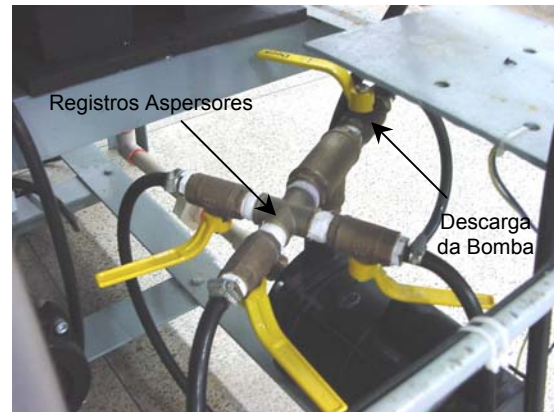
(b) Nível regulador d'água

Figura 3.14. Detalhe do sistema de refrigeração do reservatório B e do regulador de nível d'água.

A Figura 3.15a mostra detalhe das três bombas do equipamento de degradação: a bomba 1, do reservatório d'água A; a bomba 2, do reservatório d'água B; e a bomba 3, do sistema de refrigeração do reservatório B.



(a) Sistema de bombeamento.



(b) Registros da bomba.

Figura 3.15. Detalhe do sistema de bombeamento (a) e dos registros de uma das bombas do sistema.

Observa-se, ainda, que há quatro registros conectados as bombas dos reservatórios A e B, três utilizados para regular a vazão de saída d'água para cada um dos dois conjuntos de aspersores dos sistemas de lixiviação, além do registro utilizado para descarga de fundo das bombas (Figura 3.15b).

A Figura 3.16 mostra o suporte utilizado para as amostras que foram inseridas no equipamento de degradação. O porta amostras tem formato prismático, com largura igual a 25cm e altura igual a 50cm, construído com perfis de alumínio. O porta amostras foi desenvolvido para permitir uma distância mínima igual de 1cm entre cada amostra, aproximadamente. Esta distância permite o escoamento da solução de lixiviação entre as amostras. Vale ressaltar que foram colocadas 25 amostras em cada porta amostras.



Figura 3.16. Porta amostras para ensaios no equipamento de degradação.

### **3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental buscou a determinação das variações das propriedades físicas, químicas e mecânicas do material de estudo. Para isto foi definido um programa envolvendo os seguintes ensaios: análise por microscopia ótica, análise por espectrometria dispersiva de raios-X (EDX), caracterização

mecânica através de ensaio de resistência à tração não-confinada e ensaio de resistência ao puncionamento estático.

Para realização do programa experimental, os corpos-de-prova foram retirados transversalmente à direção principal da linha de produção do material na indústria (Figura 3.17a). Foram preparados 60 corpos-de-prova, sendo 30 do Geotêxtil A e 30 do Geotêxtil B, destinados aos ensaios de degradação no equipamento implementado. Os corpos-de-prova foram preparados com largura igual a 20cm e comprimento igual a 50cm (Figura 3.17b). Após a degradação, os corpos-de-prova de 20x50 cm foram recortados nas dimensões estipuladas para os ensaios de microscopia ótica, espectrometria dispersiva de raios-X, resistência à tração não-confinada e resistência ao puncionamento estático. Ressalta-se que este procedimento de preparação e as dimensões de corte dos corpos-de-prova foram os mesmos adotados por Cunha Pinto (2006).



(a) Processo de Corte (Cunha Pinto, 2006) (b) Amostra com 20x50cm  
Figura 3.17. Procedimento de amostragem.

No equipamento de degradação foram ensaiadas amostras com 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 horas de funcionamento do equipamento. A escolha destes tempos de degradação foi feita considerando o cronograma de execução definido para a presente dissertação.

### 3.4.1. Microscopia Ótica

Para a análise das amostras por microscopia ótica foi utilizado um sistema constituído por um estereoscópio, uma câmara fotográfica digital e uma fonte fluorescente de iluminação pertencentes ao Laboratório de Fotografia do Instituto de Engenharia Nuclear do Rio de Janeiro - IEN (Figura 3.18).

Esta análise foi utilizada para obter informações qualitativas sobre a textura e estrutura das amostras de geotêxteis.

Para análise por microscopia ótica foram preparadas amostras quadradas com largura igual a 2cm, aproximadamente. Na preparação, a superfície da amostra foi limpa, para não induzir erros nas análises e para que a qualidade das micrografias não fosse afetada. Foram feitas análises em amostras intactas e com 400 e 1600 horas de degradação nos geotêxteis estudados.



Figura 3.18. Estereoscópio, câmara fotográfica e fonte de iluminação utilizados na análise por microscopia ótica.

### 3.4.2. Espectrometria Dispersiva de Raios-X (EDX)

O equipamento utilizado na pesquisa para análise por espectrometria dispersiva de raios-X pertence ao Laboratório de Engenharia Civil – LECIV, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF (Figura 3.19).

Na análise por espectrometria dispersiva de raios-X, um feixe de elétrons incide sobre a superfície de uma amostra removendo elétrons da camada interna do átomo, fazendo com que o elétron da camada externa salte para ocupar a posição do elétron removido, resultando em uma emissão de energia característica do elemento analisado gerando uma imagem de cada elemento da amostra (Ribeiro, 2002).

Deste modo, a energia dos raios-X emitidos depende do material examinado. O equipamento EDX pode ser utilizado para materiais sólidos, líquidos e pulverulentos. A faixa de elementos químicos detectados pelo ensaio vai do Sódio (Na) com número atômico igual a 11 até o Urânio (U) com número atômico igual a 92.

Para análise por espectrometria dispersiva de raios-X foram utilizados corpos-de-prova com formato quadrado com 2cm de lado. Foram feitas análises para o material intacto e com 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 horas de degradação, no equipamento implementado.



Figura 3.19. Equipamento de EDX pertencente ao LECIV - UENF.



### 3.4.3. Resistência à Tração Não-Confinada

Os geossintéticos, quando utilizados para reforçar ou restringir deformações em estruturas geotécnicas, são submetidos a esforços de tração. De maneira geral, os geossintéticos utilizados para reforço de solo devem restringir as deformações e aumentar a resistência do maciço. O reforço deve conferir resistência à tração ao solo (ABINT, 2004).

O equipamento utilizado para os ensaios de tração não-confinada foi uma Máquina Universal de Ensaio Instron (Figura 3.20), pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.



Figura 3.20. Equipamento utilizado para ensaio de tração não-confinada.

O ensaio de tração é realizado sob deformação controlada até a ruptura do corpo-de-prova. Para fixação do corpo-de-prova no equipamento de ensaio, foram utilizadas garras metálicas rígidas, desenvolvidas por Cunha Pinto (2006). As

garras possuem superfícies ásperas para evitar o escorregamento do corpo-de-prova. A Figura 3.21 mostra as garras utilizadas no ensaio.

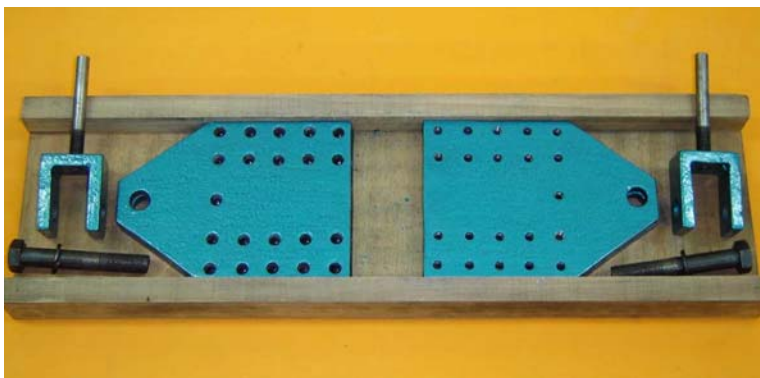


Figura 3.21. Sistema de garras rígidas paralelas.

Os corpos-de-prova destinados ao ensaio de tração foram preparados com 5cm de largura e 15cm de comprimento (Figura 3.22). A distância entre garras utilizada foi de 5cm.

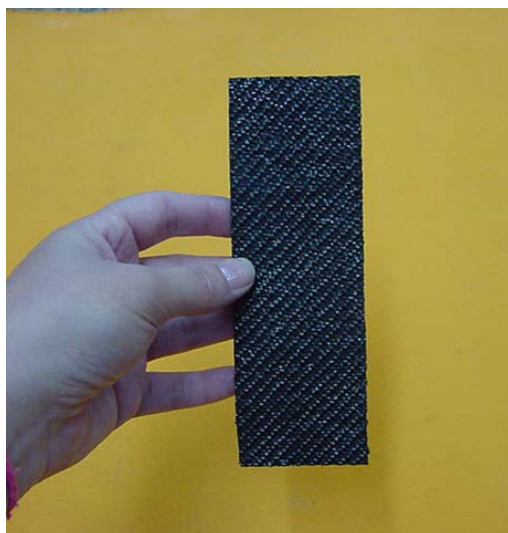


Figura 3.22. Corpo-de-prova para ensaio de tração não-confinada.

O número mínimo de corpos-de-prova utilizados para o ensaio de tração não-confinada é cinco (ABNT, 1993). Nesta pesquisa, foram ensaiados seis corpos-de-prova para cada material e nível de degradação. A velocidade de deformação do

ensaio foi adotada igual a 20% do espaçamento entre garras, por minuto, correspondendo a 10mm/min (ABNT, 1993).

A carga de tração ( $T$ ) é definida pela a força por unidade de comprimento que é aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio.

A deformação longitudinal  $\varepsilon$  do corpo-de-prova é obtida através da Equação 3.1:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (3.1)$$

onde  $\varepsilon$  é dado em porcentagem,  $\Delta L$  é a variação do comprimento em relação ao espaçamento entre garras e  $L$  é o espaçamento inicial entre garras.

Os coeficientes de variação  $C.V.$  da carga de tração na ruptura e da deformação longitudinal na ruptura são obtidos através da razão entre os valores de desvio padrão e média aritmética destes parâmetros, obtidos nos diferentes ensaios.

No ensaio de tração não-confinada obtém-se a curva carga de tração ( $T$ ) vs. deformação ( $\varepsilon$ ). A partir das curvas dos ensaios, pode-se determinar os valores da rigidez secante a 2, 5 e 10% de deformação (Figura 3.23), e a rigidez secante a 50% da carga de tração na ruptura ( $T_f$ ) (Figura 3.24).

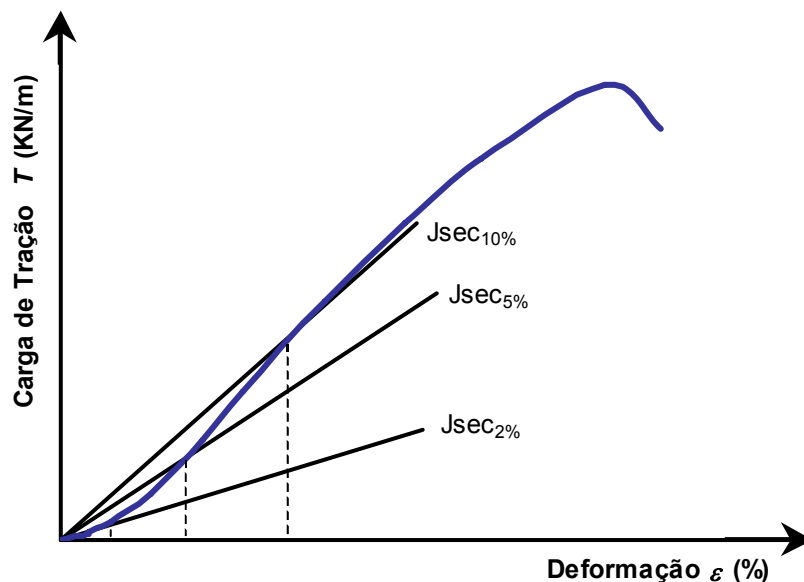


Figura 3.23. Rigidez secante a 2, 5 e 10% de deformação.



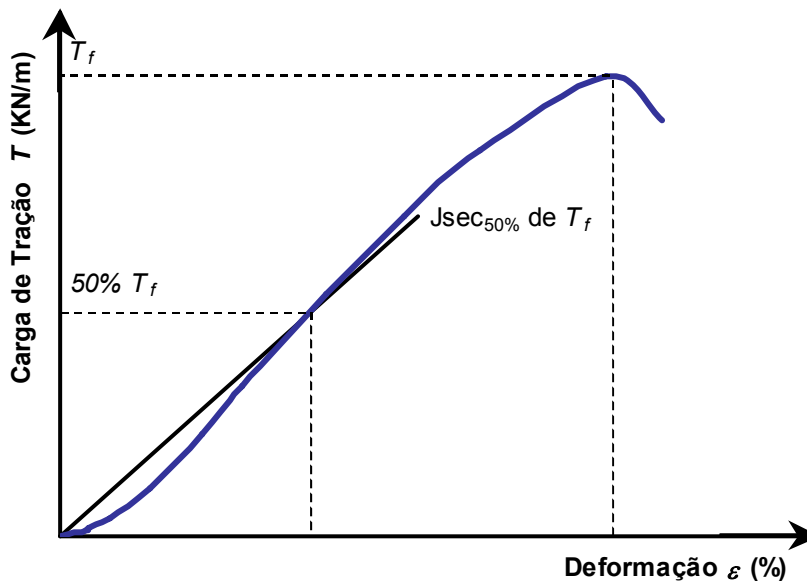


Figura 3.24. Rigidez secante a 50% da resistência à tração na ruptura.

#### 3.4.4. Resistência ao Puncionamento Estático

Os geossintéticos quando estão em contato com material granular gráudo podem ficar sujeitos a esforços de compressão localizados. Neste caso, os esforços de compressão gerados por grãos isolados podem causar sua perfuração (ABINT, 2004). Um exemplo de aplicação em que o geotêxtil é submetido a esforços de compressão é a utilização em filtros, onde durante a instalação da camada de agregados ou de pedras, o geotêxtil sofre esforços de puncionamento. Essa característica pode ser medida pelo ensaio de resistência ao puncionamento estático ou dinâmico (ABINT, 2004).

O equipamento utilizado na pesquisa para os ensaios de puncionamento estático foi o mesmo utilizado para o ensaio de tração.

A Figura 3.25a apresenta o suporte para fixação dos corpos-de-prova para realização dos ensaios de puncionamento. Os ensaios foram realizados sob deformação controlada, medindo-se a resistência à penetração de um punção (Figura 3.25b). A penetração do punção é feita na direção perpendicular ao corpo-de-prova. A velocidade de penetração do ensaio foi adotada igual a 50mm/min (ABNT, 1995).



(a) Suporte de fixação do corpo-de-prova

(b) Punção

Figura 3.25. Sistema de fixação para ensaio de puncionamento estático.

Destaca-se que o suporte para fixação do corpo-de-prova e o punção foram desenvolvidos por Cunha Pinto (2006).

O suporte cilíndrico tem diâmetro interno igual a 50mm e altura igual a 100mm (Figura 3.25a) e o punção possui diâmetro igual a 17mm (Figura 3.25b). Os corpos-de-prova foram fixados entre dois anéis metálicos revestidos com material áspero para evitar o escorregamento do corpo-de-prova durante o ensaio.

Os corpos-de-prova destinados ao ensaio de puncionamento estático são circulares com diâmetro igual a 6cm (Figura 3.26). O número mínimo de corpos-de-prova para o ensaio de puncionamento estático é cinco (ABNT, 1995). Nesta pesquisa, foram ensaiados seis corpos-de-prova para cada Geotêxtil e nível de degradação.

No ensaio de puncionamento estático obtém-se a curva força de puncionamento ( $F_P$ ) vs. penetração ( $P$ ). Com a curva do ensaio, pode-se obter a resistência ao puncionamento e a penetração na ruptura do geotêxtil.

A força de puncionamento na ruptura  $F_{Pf}$  é obtida pela média aritmética dos valores da força de puncionamento máximas de cada corpo-de-prova ensaiado.

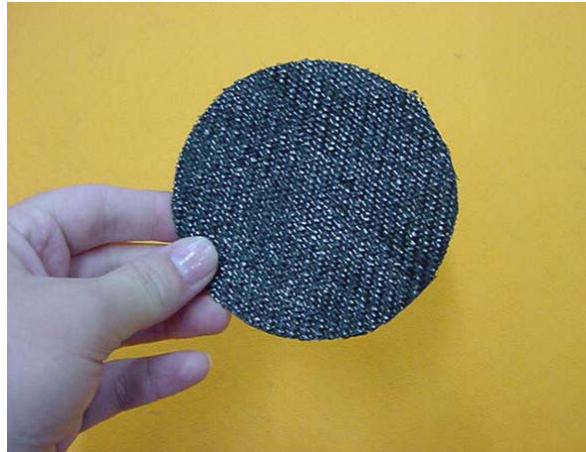


Figura 3.26. Corpo-de-prova utilizado no ensaio de puncionamento estático.

A penetração na ruptura  $P_f$  é dada através da média aritmética das penetrações máximas de cada corpo-de-prova ensaiado.

Os coeficientes de variação  $C.V.$  para a força de puncionamento e a penetração na ruptura são obtidos através da razão entre o desvio padrão e a média aritmética destes parâmetros.

### **3.4.5. Determinação das Curvas dos Ensaio Mecânicos**

Nesta pesquisa são utilizados dois ensaios mecânicos: o ensaio de resistência à tração não-confinada e o de resistência ao puncionamento estático.

No ensaio de resistência à tração não-confinada obtêm-se as curvas carga de tração vs. deformação para cada corpo-de-prova. Para o ensaio de resistência ao puncionamento estático são obtidas as curvas força de puncionamento vs. penetração para cada corpo-de-prova.

Nesta pesquisa, cada amostra do material de estudo é representada por seis corpos-de-prova referentes a cada um dos diferentes níveis de degradação. No entanto, em cada nível de degradação, os resultados são apresentados por uma única curva. Esta curva é obtida seguindo o procedimento utilizado por Cunha Pinto (2006).

Neste procedimento, para cada valor de deformação, são considerados valores médios da carga de tração obtidos no ensaio, para diferentes corpos-de-prova. Os valores médios da carga de tração obtidos através do procedimento anterior, juntamente com os valores médios da carga de tração e da deformação na ruptura, possibilitam o ajuste da curva. Este procedimento é utilizado também para obter a curva do ensaio de resistência ao puncionamento estático.

As Figuras 3.27 e 3.28 apresentam o resultado do ensaio de resistência à tração dos Geotêxteis A e B intactos segundo Cunha Pinto (2006), respectivamente.

Verifica-se uma maior dispersão das curvas obtidas no ensaio de resistência à tração não-confinada para o Geotêxtil A que no Geotêxtil B. Isto mostra que o Geotêxtil A é mais heterogêneo que o Geotêxtil B.

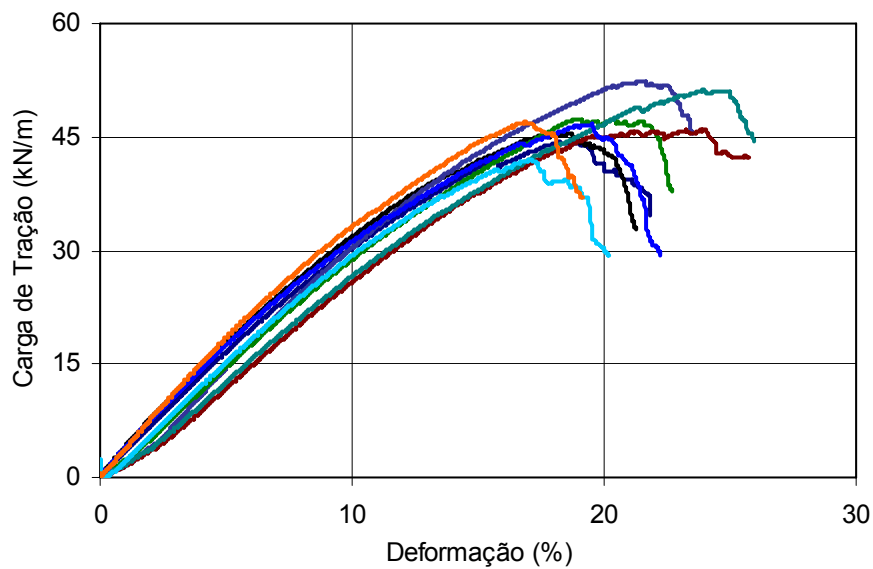


Figura 3.27. Carga de tração vs. deformação em nove corpos-de-prova do Geotêxtil A, intacto (Cunha Pinto, 2006).

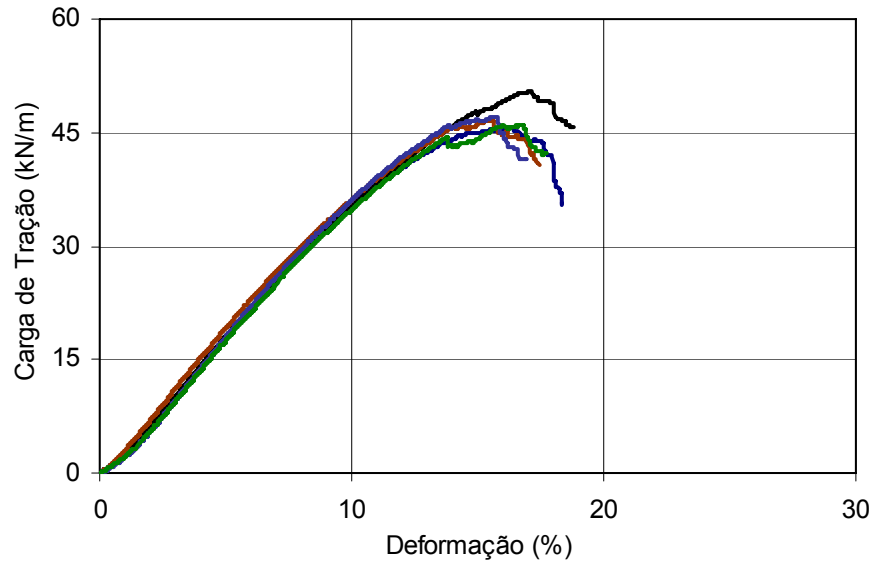


Figura 3.28. Carga de tração vs. deformação em cinco corpos-de-prova do Geotêxtil B, intacto (Cunha Pinto, 2006).

A Figura 3.29 mostra as curvas carga de tração vs. deformação dos Geotêxteis A e B intactos, obtidas através do procedimento descrito anteriormente, a partir dos resultados dos ensaios apresentados nas Figuras 3.27 e 3.28.

Observa-se que, a quantidade de aditivos utilizada no processo de fabricação influencia nos valores de deformação do material intacto.

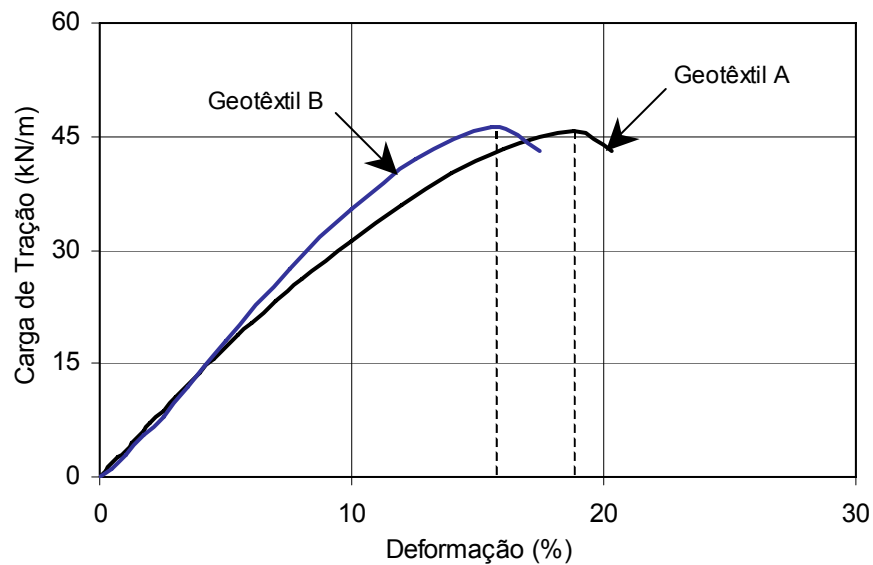


Figura 3.29. Curvas carga de tração vs. deformação dos Geotêxteis A e B intactos (Cunha Pinto, 2006).

### **3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O principal objetivo deste capítulo foi apresentar uma descrição detalhada do funcionamento e dos detalhes construtivos do equipamento de degradação implementado.

Este capítulo apresentou ainda, as características do material de estudo adotado para testar a eficiência do equipamento de degradação implementado.

A metodologia de estudo utilizada é a mesma adotada por Cunha Pinto (2006), pois se pretende comparar os resultados obtidos nas duas pesquisas.

Ressalta-se que o programa experimental proposto visa a avaliação das modificações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais devido à degradação no equipamento.

Deste modo, os ensaios de caracterização da resistência e da deformabilidade dos materiais de estudo constituem o objetivo principal do programa experimental da dissertação. A caracterização dos geotêxteis visa não somente a quantificação das propriedades de tais materiais, mas também, a avaliação das variações no comportamento devido às suas características intrínsecas.

## **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

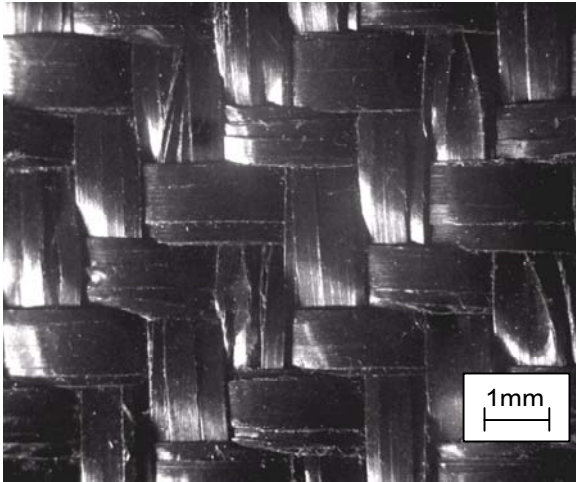
Neste capítulo são apresentados os resultados das análises por microscopia ótica, espectrometria dispersiva de raios-X e ensaios de tração não-confinada e punção estática, realizados com os dois tipos de geotêxteis tecido utilizados na pesquisa: Geotêxtil A, com maior teor de aditivos antioxidantes, e Geotêxtil B, com um teor de antioxidantes cerca de 50% a menos que Geotêxtil A.

São feitas comparações entre os resultados mecânicos obtidos nesta pesquisa, utilizando o equipamento de degradação implementado e os resultados obtidos por Cunha Pinto (2006). Destaca-se que Cunha Pinto (2006) utilizou o processo de degradação natural no campo e no laboratório. No laboratório, os geotêxteis foram submetidos à degradação por lixiviação contínua e ciclos de umedecimento e secagem.

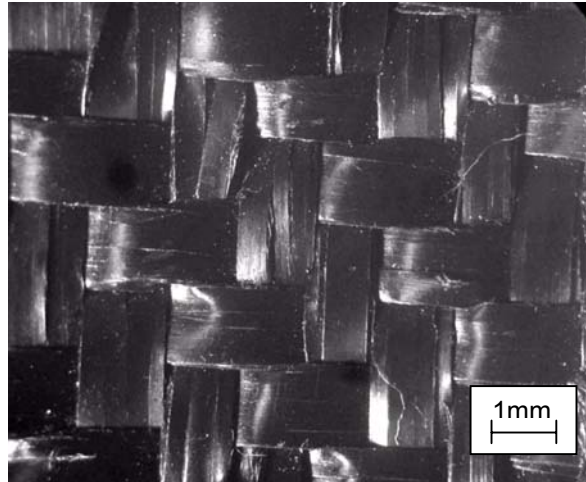
### **4.2. MICROSCOPIA ÓTICA**

A Figura 4.1 mostra as micrografias dos Geotêxteis A e B, intactos e com 400 e 1600h de degradação. A análise por microscopia ótica mostrou que a estrutura física dos geotêxteis estudados é pouco afetada para baixos níveis de degradação (Figuras 4.1c e 4.1d). No entanto, para elevado nível de degradação (Figura 4.1e e 4.1f), observa-se uma sensível dilatação das fibras dos geotêxteis. Isto provoca a compressão das fibras na região do entrelaçamento promovendo uma pequena retração dos geotêxteis.

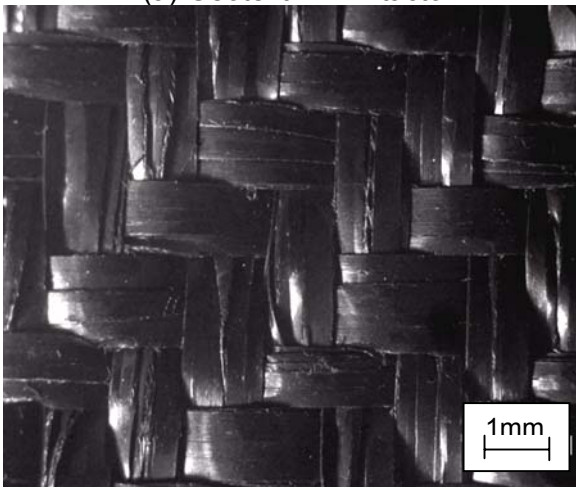
Ressalta-se que, o comportamento do material de estudo analisado por microscopia ótica foi o mesmo observado por Cunha Pinto (2006) na análise feita por microscopia eletrônica de varredura nos materiais degradados no campo e no laboratório.



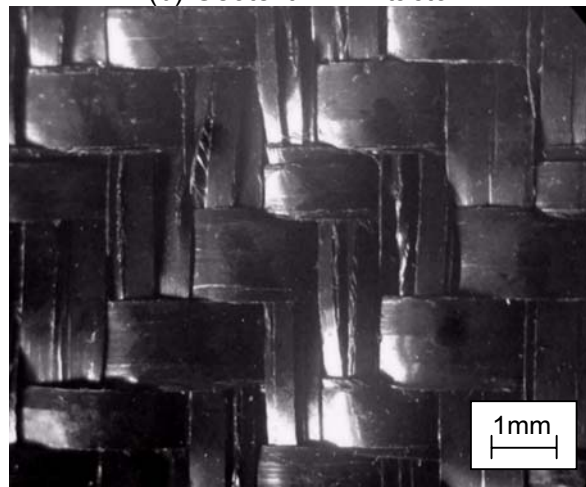
(a) Geotêxtil A - Intacto



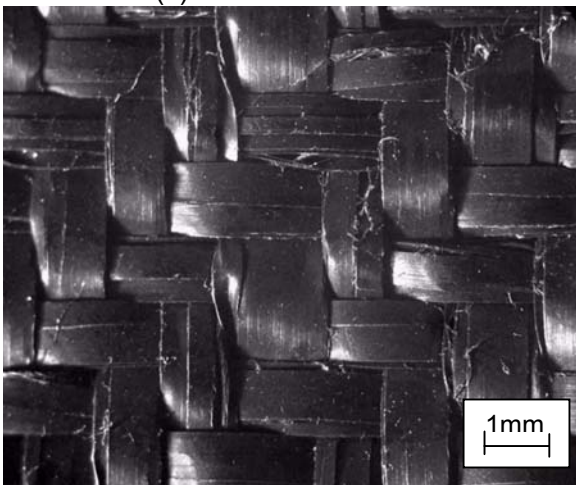
(b) Geotêxtil B - Intacto



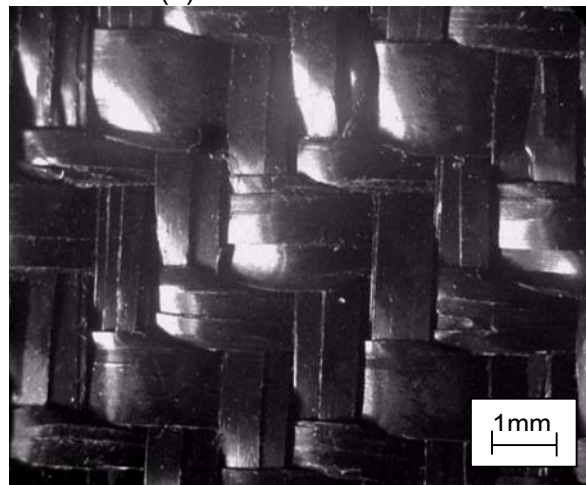
(c) Geotêxtil A - 400h



(d) Geotêxtil B - 400h



(e) Geotêxtil A - 1600h



(f) Geotêxtil B - 1600h

Figura 4.1. Micrografias dos Geotêxteis A e B, intactos e degradados no equipamento implementado.



### 4.3. ESPECTROMETRIA DISPERSIVA DE RAIOS-X (EDX)

Na análise por espectrometria dispersiva de raios-X buscou-se determinar o nível de oxidação nos Geotêxteis A e B, através do aparecimento ou aumento da quantidade de óxidos presente nas amostras.

Considerando que a determinação dos óxidos na análise por EDX podem resultar consideráveis erros de interpretação, especialmente devido à forma de identificação dos elementos detectados e pelo tipo de estrutura cristalina dos óxidos, muitas vezes com forma amorfa, a representação dos resultados é feita através da relação entre os óxidos lixiviados e os óxidos residuais.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam a quantidade de óxidos lixiviados e residuais em diferentes níveis de degradação nos Geotêxteis A e B, respectivamente.

A quantidade de óxidos lixiviados é obtida através da soma dos óxidos que reduzem em concentração. Entende-se por quantidade de óxidos residuais a soma dos óxidos que aumentam em concentração para cada nível de degradação.

Tabela 4.1. Quantidade de óxidos lixiviados e residuais no Geotêxtil A.

<b>Tempo (Horas)</b>	<b>Óxidos Lixiviados (%)</b>	<b>Óxidos Residuais (%)</b>	<b>ΣΔÓxidos Lixiviados (%)</b>	<b>ΣΔÓxidos Residuais (%)</b>
50	90,276	9,724	7,056	1,892
100	89,924	10,076	4,817	7,064
200	85,889	14,111	2,494	2,857
400	78,215	21,785	10,168	8,792
800	83,894	16,106	0,674	4,958
1600	80,908	19,092	2,312	7,476

Tabela 4.2. Quantidade de óxidos lixiviados e residuais no Geotêxtil B.

<b>Tempo (Horas)</b>	<b>Óxidos Lixiviados (%)</b>	<b>Óxidos Residuais (%)</b>	<b>ΣΔÓxidos Lixiviados (%)</b>	<b>ΣΔÓxidos Residuais (%)</b>
50	88,718	11,282	6,34	7,093
100	87,397	12,603	5,019	7,35
200	92,791	7,209	10,413	4,456
400	85,99	14,01	3,612	4,789
800	87,697	12,303	5,319	15,044
1600	77,096	22,904	9,476	11,209

O somatório da variação da quantidade de óxidos lixiviados e de óxidos residuais é obtido através da comparação entre a quantidade de óxidos encontrado no material intacto e degradado.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam a relação entre a quantidade de óxidos lixiviados e óxidos residuais nos Geotêxteis A e B, respectivamente.

Cada ponto no gráfico representa uma relação entre a quantidade de óxidos lixiviados e residuais, para cada nível de degradação. Deste modo uma reta inclinada a 45° em relação ao eixo das ordenadas indica a posição onde os óxidos lixiviados são precipitados. Além disto, o afastamento do ponto referente à relação entre os óxidos lixiviado e residual para cima desta reta indica o aumento da lixiviação. Quando o ponto se afasta para baixo da reta ocorre o aumento da precipitação de óxidos.

Da Figura 4.2 verifica-se que, no Geotêxtil A, a lixiviação foi superior a precipitação para o material com 50 e 400h de degradação. No Geotêxtil B, verifica-se o mesmo comportamento para o material com 200h de degradação (Figura 4.3).

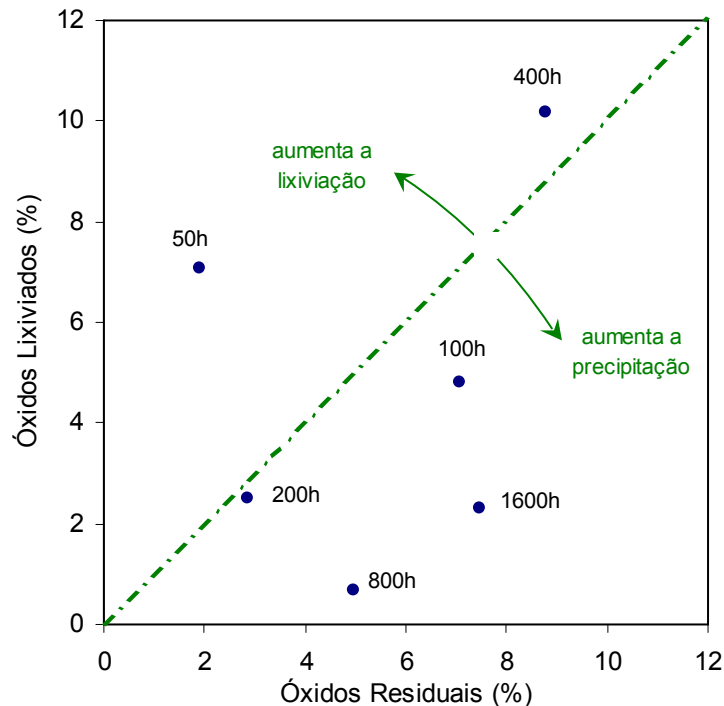


Figura 4.2. Variação da quantidade de óxidos lixiviados vs. óxidos residuais, Geotêxtil A.

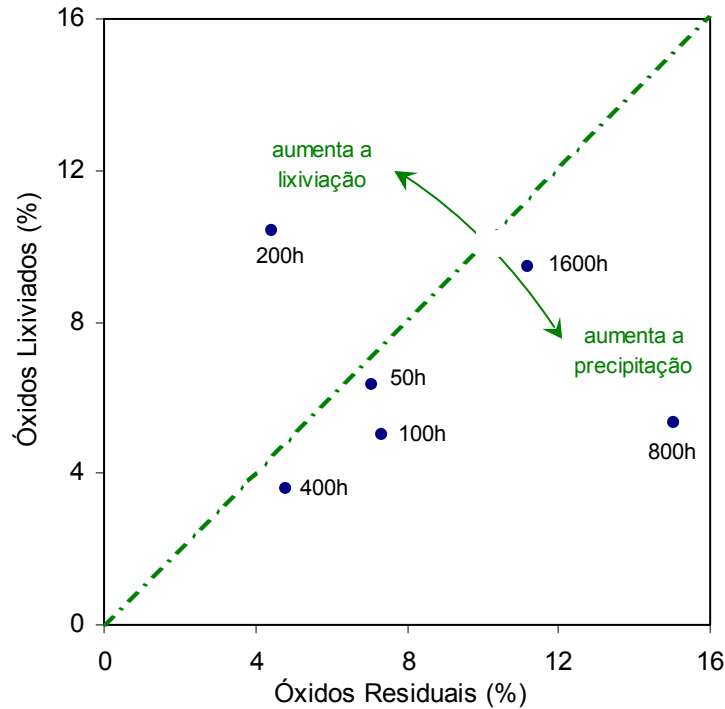


Figura 4.3. Variação da quantidade de óxidos lixiviados vs. óxidos residuais, Geotêxtil B.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram que a concentração de óxidos tende a ser superior a lixiviação, principalmente para elevados níveis de degradação.

Dos resultados apresentados, verifica-se a tendência à oxidação dos geotêxteis estudados com o aumento da degradação. Verifica-se ainda, uma maior oxidação do Geotêxtil B que do Geotêxtil A. Isto se justifica pelas maiores porcentagens de óxidos lixiviados e residuais no Geotêxtil B.

#### **4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NÃO-CONFINADA**

A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de resistência à tração não-confinada realizados nos materiais de estudo após a degradação natural no campo e no laboratório. No laboratório, os geotêxteis são submetidos a processos de degradação por ciclos de umedecimento e secagem, lixiviação contínua e pelo equipamento de degradação.

Inicialmente, são apresentados os resultados dos ensaios e os parâmetros obtidos e, posteriormente, são feitas considerações sobre os resultados apresentados.

#### 4.4.1. Carga de Tração vs. Deformação

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram as variações da carga de tração com a deformação dos Geotêxteis A e B com diferentes níveis de degradação, respectivamente.

Observa-se que ocorre mudança no comportamento carga de tração vs. deformação dos geotêxteis quando submetidos à degradação. Isto pode ser verificado pela comparação das curvas carga de tração vs. deformação dos materiais intactos e degradados (Figuras 4.4 e 4.5).

A diferença de resposta observada sugere que a quantidade de aditivos antioxidantes utilizada na fabricação influencia no comportamento de durabilidade dos geotêxteis estudados.

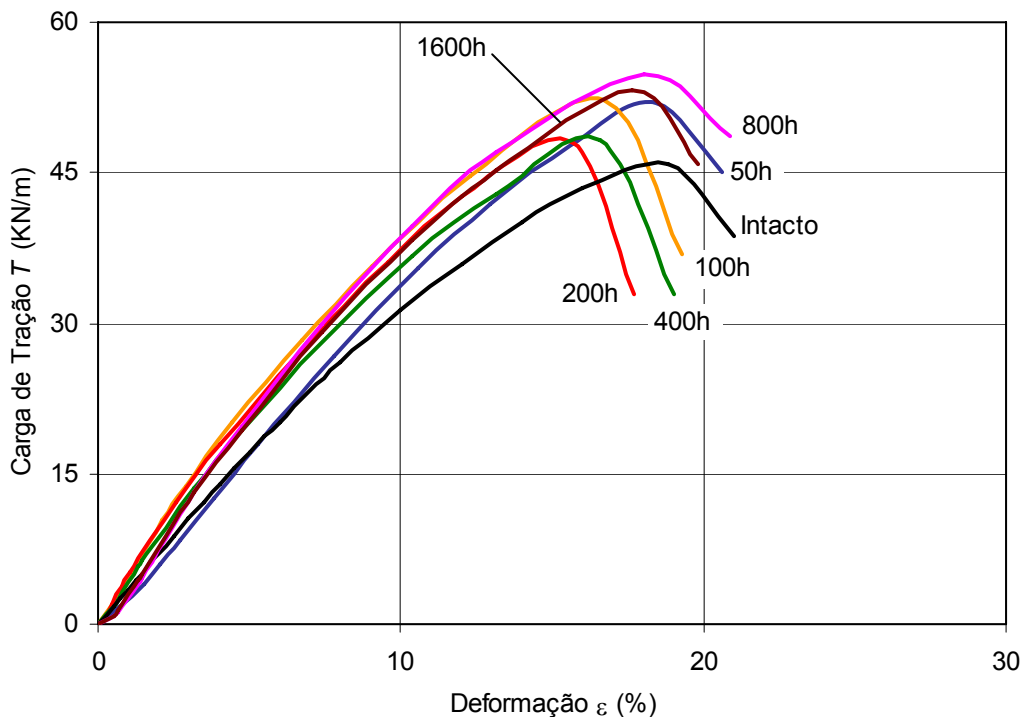


Figura 4.4. Carga de tração vs. deformação do Geotêxtil A, em diferentes níveis de degradação.

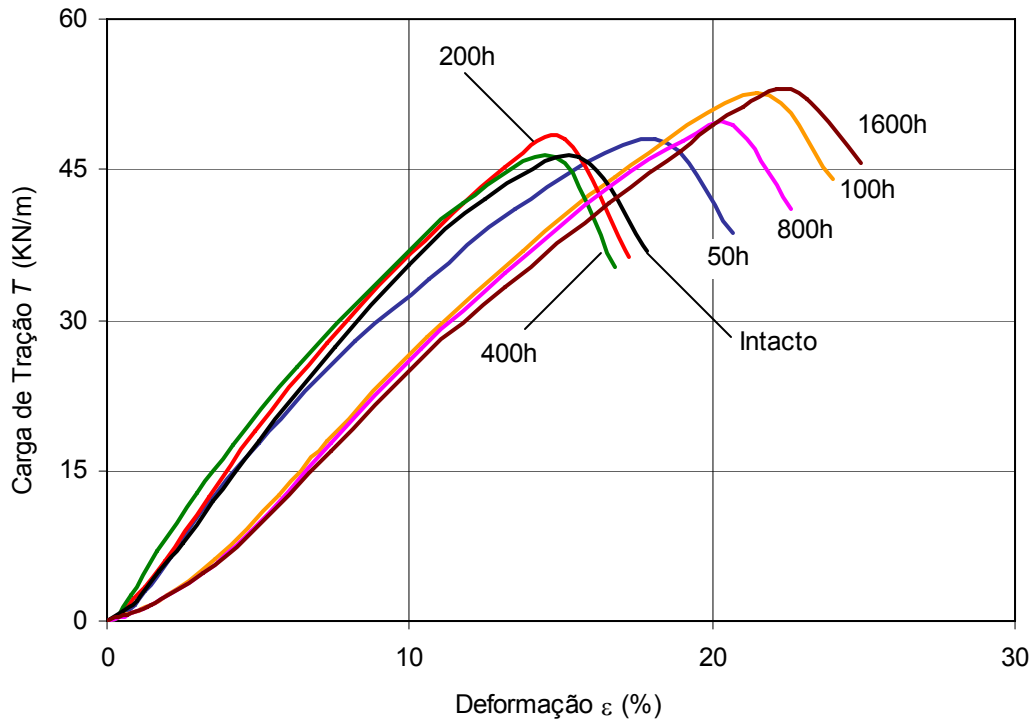


Figura 4.5. Curvas carga de tração vs. deformação do Geotêxtil B, em diferentes níveis de degradação.

#### 4.4.2. Parâmetros dos Materiais Degradados

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam a variação da carga de tração e da deformação na ruptura  $T_f$  e  $\varepsilon_f$ , respectivamente, dos Geotêxteis com diferentes tipos e intensidades de degradação. Apresentam-se também os coeficientes de variação de  $T_f$  e  $\varepsilon_f$ .

Observa-se que o eventual aumento dos valores dos coeficientes de variação de  $T_f$  e  $\varepsilon_f$ , do Geotêxtil A degradado no campo ou no laboratório, em relação ao mesmo Geotêxtil intacto (Tabela 4.3), indica um aumento na heterogeneidade do material devido à degradação. Deve-se considerar, ainda, a possibilidade da degradação ter ocorrido de forma não-homogênea, mesmo sendo tomadas medidas específicas para evitar este tipo de problema. Nesta pesquisa, durante o procedimento de degradação dos materiais no equipamento implementado, fez-se o revezamento dos corpos-de-prova dentro da câmara de degradação de duas formas distintas: mudando os suportes dos corpos-de-prova de posição no interior

da câmara de degradação do equipamento, e mudando a posição dos corpos-de-prova no próprio suporte.

Da Tabela 4.4, nota-se que os valores dos coeficientes  $CV_{Tf}$  e  $CV_{\varepsilon_f}$  do Geotêxtil B intacto são superiores aos valores encontrados para o Geotêxtil A. Neste caso, isso pode indicar uma maior heterogeneidade no Geotêxtil B em relação ao Geotêxtil A.

Ressalta-se que os valores do coeficiente  $CV_{Tf}$  dos Geotêxteis A e B degradados no campo ou no laboratório foram inferiores aos valores de  $CV_{\varepsilon_f}$  (Tabelas 4.3 e 4.4). Isto pode ser justificado pela influência da resistência e condição de entrelaçamento das fibras na resposta do material quando solicitado à tração. No ensaio de tração, a força aplicada é resistida apenas pelas fibras na direção do carregamento, o que fornece ao material um comportamento homogêneo, pois a resistência da fibra tem pouca variabilidade. A deformação, no entanto, é influenciada pela condição de entrelaçamento das fibras, que é influenciada pela degradação (Figura 4.1), o que torna o material mais heterogêneo, justificando assim, maiores valores do  $CV_{\varepsilon_f}$ .

Tabela 4.3. Variação da carga de tração e deformação na ruptura, Geotêxtil A.

Procedimento de Degradação	Nível de Degradação (h)	$T_f$ (KN/m)	$CV_{Tf}$ (%)	$\varepsilon_f$ (%)	$CV_{\varepsilon_f}$ (%)
<i>Intacto*</i>	0	45,81±0,90	1,96	18,80±0,93	4,93
<i>Degradação Natural no Campo*</i>	2160	48,57±1,56	3,21	17,99±0,76	4,25
	4320	42,12±2,21	5,24	15,73±1,75	11,15
	10080	37,44±2,57	6,85	15,82±1,25	7,91
<i>Degradação por Lixiviação Contínua*</i>	200	50,66±2,28	4,50	27,28±2,12	7,76
	400	54,09±2,63	4,86	25,90±2,23	8,62
	800	47,91±1,94	4,04	21,74±0,98	4,49
	1600	51,72±2,57	4,96	24,39±1,13	4,64
	3200	49,21±1,60	3,25	22,40±1,29	5,74
<i>Degradação por Ciclos de Saturação e Secagem*</i>	100	55,59±2,87	5,15	37,63±5,30	14,08
	180	51,63±1,49	2,89	38,69±2,27	5,87
	360	37,96±1,22	3,20	26,29±2,01	7,63
	720	33,17±2,66	8,01	24,94±1,56	6,24
<i>Degradação no Equipamento de Degradação</i>	50	52,04±1,45	4,03	18,38±0,96	4,97
	100	52,20±1,66	5,26	16,74±0,59	2,05
	200	47,97±1,71	6,11	15,63±1,06	7,23
	400	48,22±0,42	0,37	16,59±0,63	2,42
	800	54,85±0,94	1,60	18,02±1,17	7,57
	1600	53,21±1,02	1,96	17,67±1,06	6,42

\* Resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

Tabela 4.4. Resultados do ensaio de resistência à tração na ruptura, Geotêxtil B.

Procedimento de Degradação	Nível de Degradação (h)	$T_f$ (KN/m)	$CV_{Tf}$ (%)	$\varepsilon_f$ (%)	$CV_{\varepsilon_f}$ (%)
<i>Intacto*</i>	0	46,30±2,44	5,26	15,59±1,24	7,95
<i>Degradação Natural no Campo*</i>	2160	47,90±0,51	1,05	13,07±0,46	3,49
	4320	42,80±1,24	2,90	12,22±0,84	6,84
	10080	40,54±1,33	3,28	12,60±0,58	4,63
<i>Degradação por Lixiviação Contínua*</i>	200	45,50±1,11	2,44	19,81±0,91	4,60
	400	47,24±0,38	0,80	22,87±1,19	5,22
	800	51,05±3,54	6,94	25,47±2,35	9,24
	1600	49,04±1,66	3,38	23,82±2,66	11,18
	3200	48,79±1,22	2,50	24,91±2,98	11,95
<i>Degradação por Ciclos de Saturação e Secagem*</i>	100	52,07±1,64	3,15	31,67±1,36	4,28
	180	47,34±3,17	6,88	27,73±2,63	9,50
	360	53,41±1,97	3,68	32,98±1,91	5,80
	720	55,06±2,46	4,46	38,00±2,67	7,02
<i>Degradação no Equipamento de Degradação</i>	50	48,05±1,32	3,61	18,10±1,19	7,89
	100	52,58±0,95	1,72	21,45±0,80	2,97
	200	48,10±1,69	5,95	15,12±0,25	0,40
	400	46,19±1,76	6,68	14,82±1,21	9,89
	800	49,50±2,05	8,49	20,71±0,99	4,76
	1600	52,52±1,33	3,37	23,13±1,38	8,24

\* Resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam a variação dos valores da rigidez secante a 2, 5 e 10% da deformação e a rigidez secante a 50% da carga de tração na ruptura  $T_f$  para os diferentes tipos e intensidades de degradação dos Geotêxteis A e B.

Tabela 4.5. Variação da rigidez quanto ao tipo e nível de degradação, Geotêxtil A.

Procedimento de Degradação	Nível de Degradação (h)	Rigidez Secante a 50% de $T_f$ (KN/m)	Rigidez Secante nas Deformações (KN/m)		
			$J_{sec2\%}$	$J_{sec5\%}$	$J_{sec10\%}$
<i>Intacto*</i>	0	332,34	351,12	342,39	313,09
<i>Degradação Natural no Campo*</i>	2160	301,65	188,58	272,61	306,12
	4320	293,19	168,41	270,37	298,21
	10080	250,45	146,94	227,74	259,19
<i>Degradação por Lixiviação Contínua*</i>	200	217,50	129,86	180,33	214,92
	400	240,12	139,81	197,85	237,66
	800	247,76	133,58	202,42	249,26
	1600	240,19	123,99	192,70	238,95
	3200	244,41	125,65	197,64	244,34
<i>Degradação por Ciclos de Saturação e Secagem*</i>	100	146,68	60,74	93,16	120,65
	180	135,62	80,51	88,45	110,52
	360	134,87	81,28	89,79	116,78
	720	126,45	81,53	88,56	113,05
<i>Degradação no Equipamento de Degradação</i>	50	337,95	286,65	341,16	336,28
	100	420,98	483,89	440,39	382,96
	200	413,50	472,75	425,49	370,56
	400	382,67	432,51	403,66	354,71
	800	409,29	364,12	415,21	383,10
	1600	385,60	379,65	406,93	370,21

\* Resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

Observa-se que os valores da rigidez secante são influenciados pelo procedimento de degradação do equipamento desenvolvido.

Tabela 4.6. Variação da rigidez quanto ao tipo e nível de degradação, Geotêxtil B.

Procedimento de Degradação	Nível de Degradação (h)	Rigidez Secante a 50% de Tf (KN/m)	Rigidez Secante nas Deformações (KN/m)		
			Jsec2%	Jsec5%	Jsec10%
<i>Intacto*</i>	0	362,24	293,83	359,92	336,47
<i>Degradação Natural no Campo*</i>	2160	439,28	376,45	440,13	405,78
	4320	436,53	438,88	435,92	387,39
	10080	390,07	338,86	387,63	245,85
<i>Degradação por Lixiviação Contínua*</i>	200	245,96	127,61	191,82	251,17
	400	224,28	109,66	168,75	222,91
	800	211,57	91,13	145,85	202,81
	1600	221,39	112,90	169,14	220,55
	3200	202,29	76,96	131,40	192,45
<i>Degradação por Ciclos de Saturação e Secagem*</i>	100	177,42	89,04	110,86	155,05
	180	191,36	96,26	140,85	182,90
	360	172,93	90,75	108,73	149,38
	720	155,19	75,00	91,94	125,23
<i>Degradação no Equipamento de Degradação</i>	50	333,68	307,13	354,76	328,36
	100	262,88	132,43	210,93	264,08
	200	369,98	327,01	386,72	363,50
	400	398,22	421,29	412,06	367,35
	800	252,54	128,21	198,48	258,18
	1600	247,74	130,00	191,36	248,62

\* Resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

#### 4.4.3. Carga de Tração na Ruptura

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a variação da carga de tração na ruptura vs. tempo de degradação dos Geotêxteis A e B degradados no campo e no laboratório, respectivamente.

Nota-se que os procedimentos de degradação no campo e no laboratório influenciam na variação do comportamento da carga de tração dos geotêxteis.

Os valores da carga de tração na ruptura do Geotêxtil A (Figura 4.6) aumentam para baixos níveis de degradação e reduzem para elevados níveis de degradação no equipamento. Este comportamento foi verificado também no material



degradado naturalmente no campo e pelos outros procedimentos de degradação no laboratório. No entanto, ressalta-se que a ciclagem de umedecimento e secagem foi o processo de degradação no laboratório que provocou maiores modificações nos valores da carga de tração em menos tempo.

Verifica-se que a tendência de variação da carga de tração na ruptura dos Geotêxteis A e B são similares, em baixos níveis de degradação (Figuras 4.6 e 4.7). No entanto, em elevados níveis de degradação, observa-se que apenas a degradação no campo provoca comportamentos similares nos geotêxteis.

Dos resultados apresentados, nota-se que a tendência de variação da carga de tração na ruptura do material degradado no campo ou no laboratório mostrou-se similar para os dois geotêxteis estudados. Isto indica que o procedimento de degradação no equipamento simula satisfatoriamente a degradação no campo ou no laboratório por lixiviação contínua e por ciclos de umedecimento e secagem.

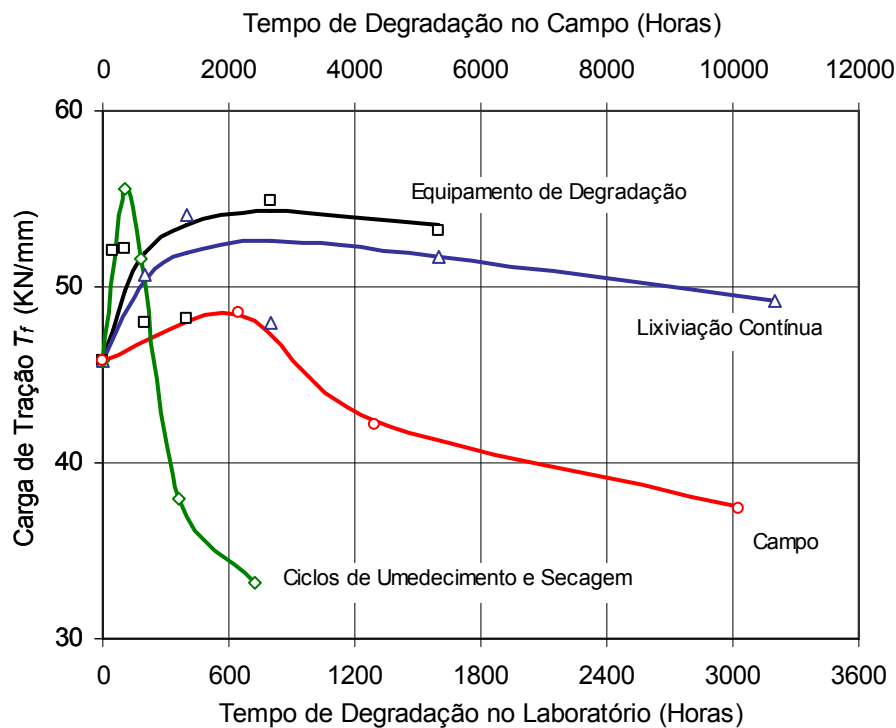


Figura 4.6. Carga de tração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório do Geotêxtil A.

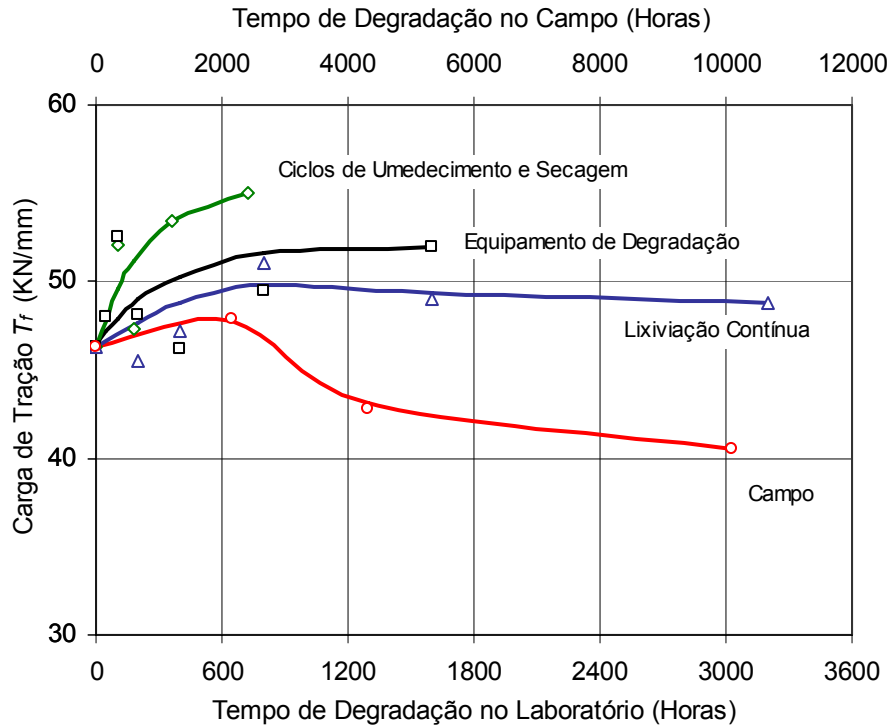


Figura 4.7. Carga de tração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório do Geotêxtil B.

#### 4.4.4. Deformação na Ruptura

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam variação da deformação na ruptura dos Geotêxteis A e B degradados no campo ou no laboratório, com diferentes níveis de degradação.

Nota-se que a variação da deformação na ruptura também é influenciada pela quantidade de aditivos antioxidantes utilizados na fabricação dos geotêxteis.

Os valores da deformação na ruptura do Geotêxtil A, degradado no equipamento, reduzem para baixos níveis de degradação em relação ao material intacto, estabilizando para elevados níveis de degradação (Figura 4.8).

No Geotêxtil A, degradado por lixiviação contínua e ciclos de umedecimento e secagem, verifica-se um aumento no valor da deformação na ruptura em relação ao material intacto em baixos níveis de degradação e uma redução em elevadas intensidades (Figura 4.8). Isto sugere a não representatividade da degradação

causada por estes procedimentos de degradação no laboratório e das condições de campo.

Os valores da deformação na ruptura do Geotêxtil B, degradado por diferentes procedimentos no laboratório, aumentam com a intensidade de degradação (Figura 4.9). Observa-se que a variação da deformação na ruptura do Geotêxtil B degradado no laboratório não é representativa da degradação no campo.

O aumento da deformação na ruptura com o tempo de degradação pode indicar uma mudança na estrutura molecular da cadeia polimérica sob influência da temperatura e umidade. Isto foi observado também na análise por espectrometria dispersiva de raios-X.

Destaca-se que a perda de resistência e o aumento da deformação com o aumento do nível de degradação indicam uma tendência à fragilidade dos geotêxteis.

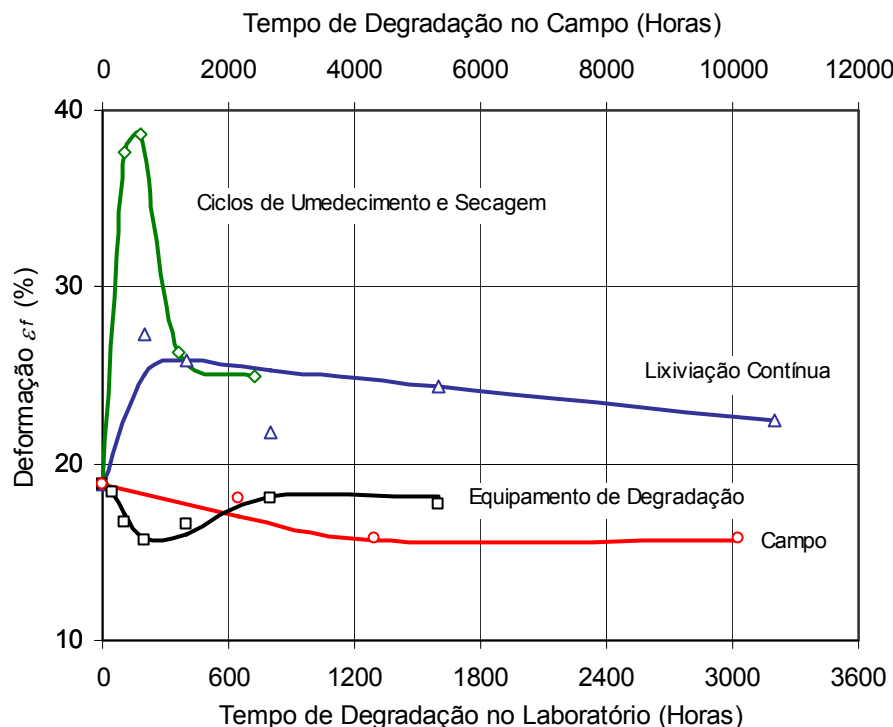


Figura 4.8. Deformação na ruptura vs. tempo de degradação natural no campo e no laboratório para Geotêxtil A.

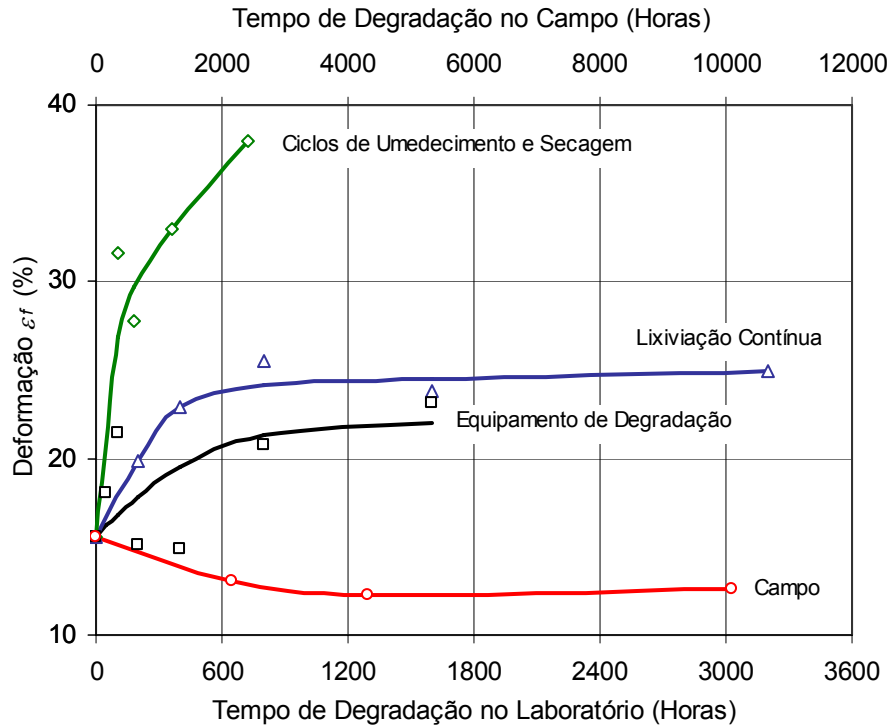


Figura 4.9. Deformação na ruptura vs. tempo de degradação natural no campo e no laboratório para Geotêxtil B.

#### 4.4.5. Efeito da Degradação na Rigidez

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam as variações dos valores da rigidez secante a 2, 5, 10% de deformação e a 50% da carga de ruptura dos Geotêxteis A e B, com diferentes níveis de degradação.

Observa-se que os valores da rigidez dos geotêxteis são influenciados pelo procedimento de degradação no equipamento. Ressalta-se que os valores da rigidez secante para baixos valores de deformação são as rigidezes que sofrem maiores influências dos efeitos da degradação em ambos materiais.

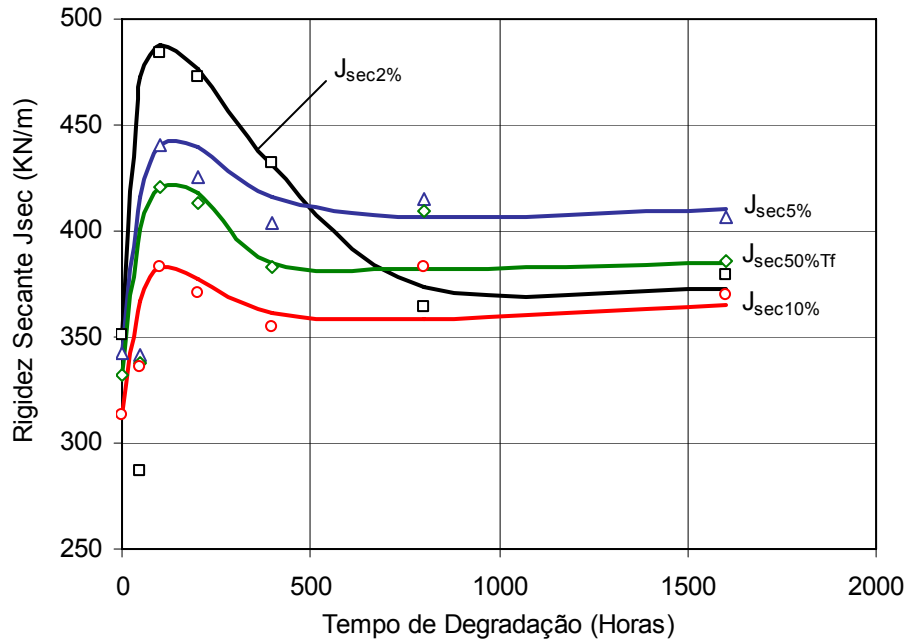


Figura 4.10. Rigidez Secante a 2, 5 e 10% de deformação e a 50% de  $T_f$  para diferentes níveis de degradação, Geotêxtil A.

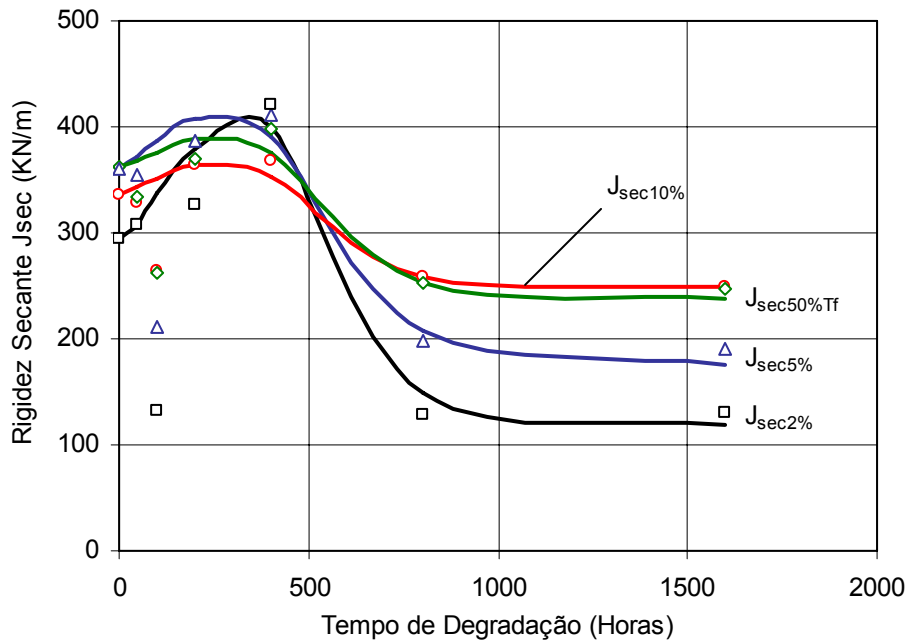


Figura 4.11. Rigidez Secante a 2, 5 e 10% de deformação e a 50% de  $T_f$  para diferentes níveis de degradação, Geotêxtil B.

A rigidez secante a 2, 5 e 10% de deformação e a 50% da carga de ruptura dos Geotêxteis A e B são apresentadas nas Figuras 4.12 à 4.19.

Observa-se que os valores da rigidez dos geotêxteis são significativamente influenciados pelos procedimentos de degradação no campo e no laboratório (Figuras 4.12 a 4.19).

Nota-se que no Geotêxtil A, degradado no campo e no laboratório por ciclos de umedecimento e secagem e lixiviação contínua, ocorre a redução dos valores da rigidez com o aumento da intensidade de degradação. Este comportamento sugere que o geotêxtil torna-se mais frágil com o aumento da degradação.

Ressalta-se que a variação da rigidez do Geotêxtil A degradado no equipamento não é representativa das condições de degradação no campo (Figuras 4.12, 4.14, 4.16 e 4.18).

Os valores da rigidez do Geotêxtil B (Figuras 4.13, 4.15, 4.17 e 4.19) degradado no equipamento aumentam para baixos níveis de degradação e reduzem para elevados níveis de degradação, tendendo à estabilização. Isto sugere que o geotêxtil sofreu enrijecimento para baixos níveis de degradação, tendendo à fragilidade para elevados níveis.

Para avaliar a variação da rigidez do Geotêxtil B degradado no campo e no laboratório, faz-se análise em duas fases distintas: a fase inicial, correspondente a baixos níveis de degradação; e a fase final, referente a elevados níveis de degradação.

Na fase inicial, observa-se a mesma tendência de variação dos valores da rigidez do Geotêxtil B degradado no campo e no laboratório (Figuras 4.13, 4.15, 4.17 e 4.19).

Na fase final, verifica-se a mesma tendência de variação dos valores da rigidez no material degradado no equipamento e por procedimentos de lixiviação contínua e ciclos de umedecimento e secagem.

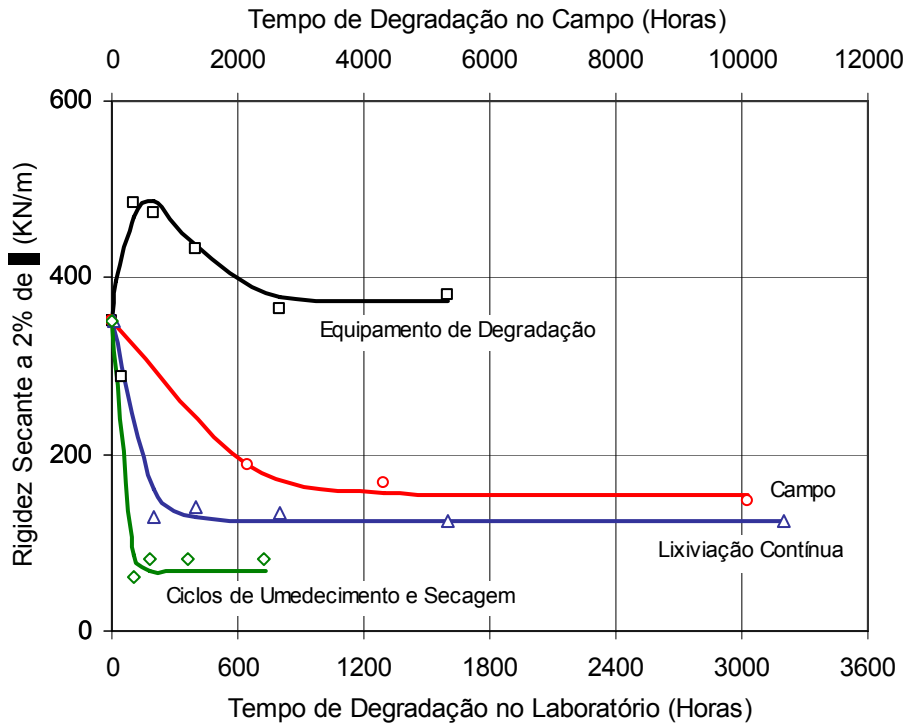


Figura 4.12. Rigidez Secante a 2% de  $\epsilon$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.

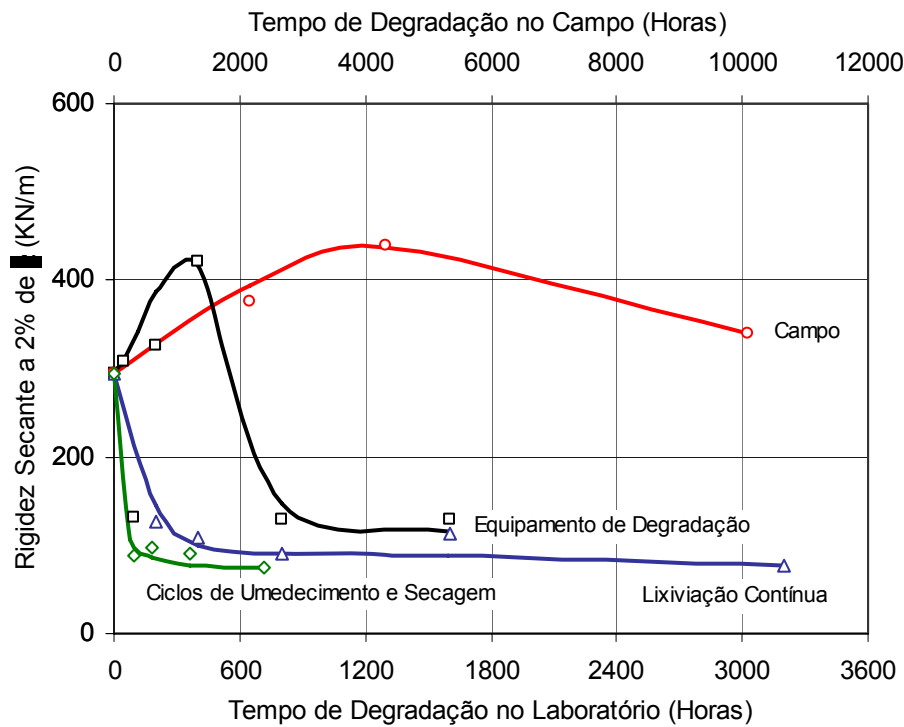


Figura 4.13. Rigidez Secante a 2% de  $\epsilon$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.

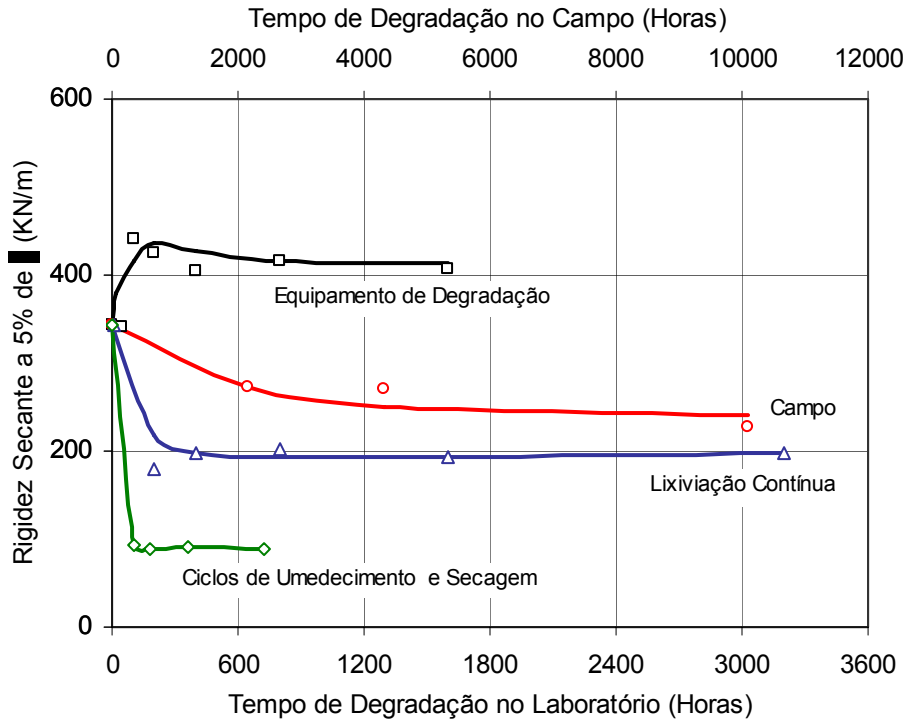


Figura 4.14. Rigidez Secante a 5% de  $\epsilon$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.

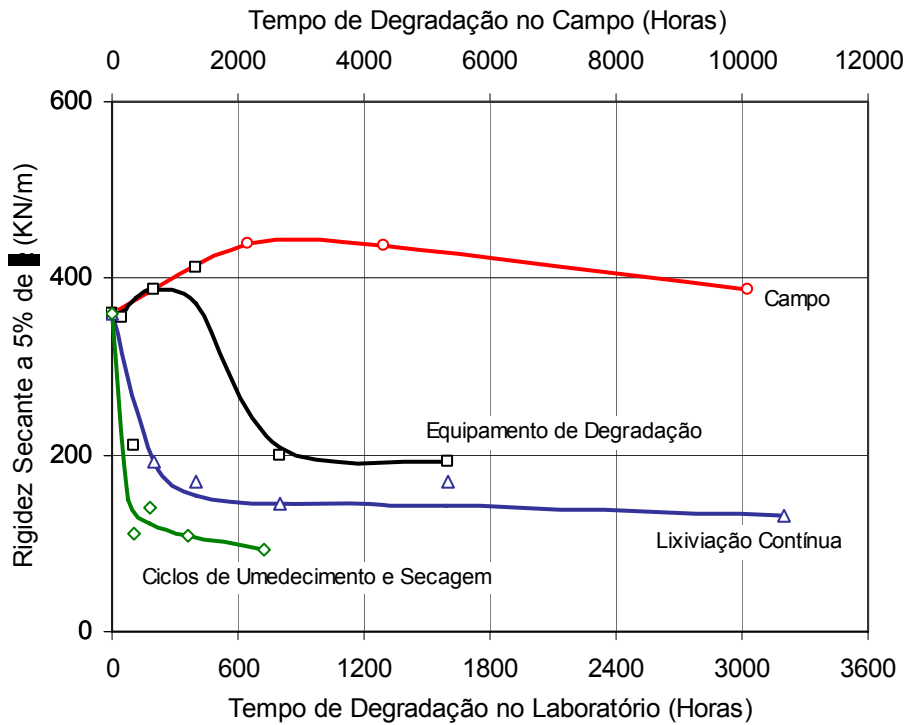


Figura 4.15. Rigidez Secante a 5% de  $\epsilon$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.



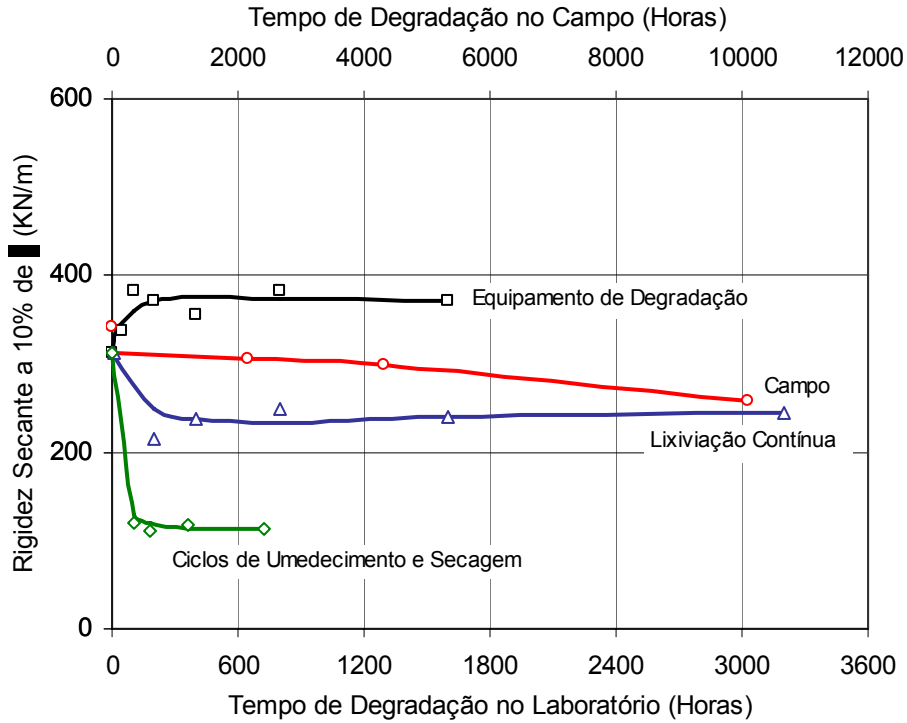


Figura 4.16. Rigidez Secante a 10% de  $\epsilon$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.

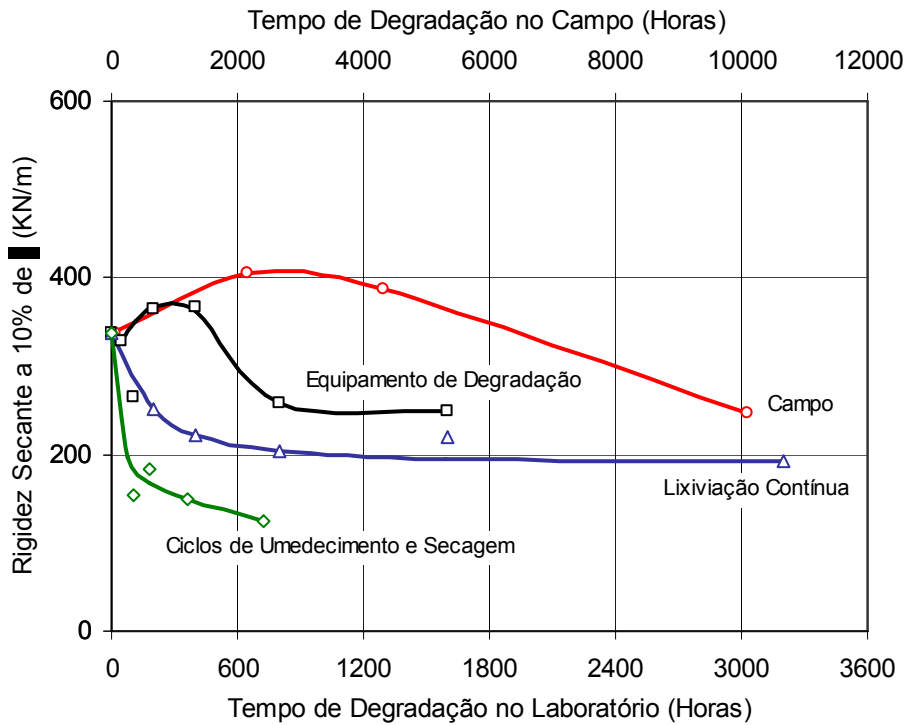


Figura 4.17. Rigidez Secante a 10% de  $\epsilon$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.

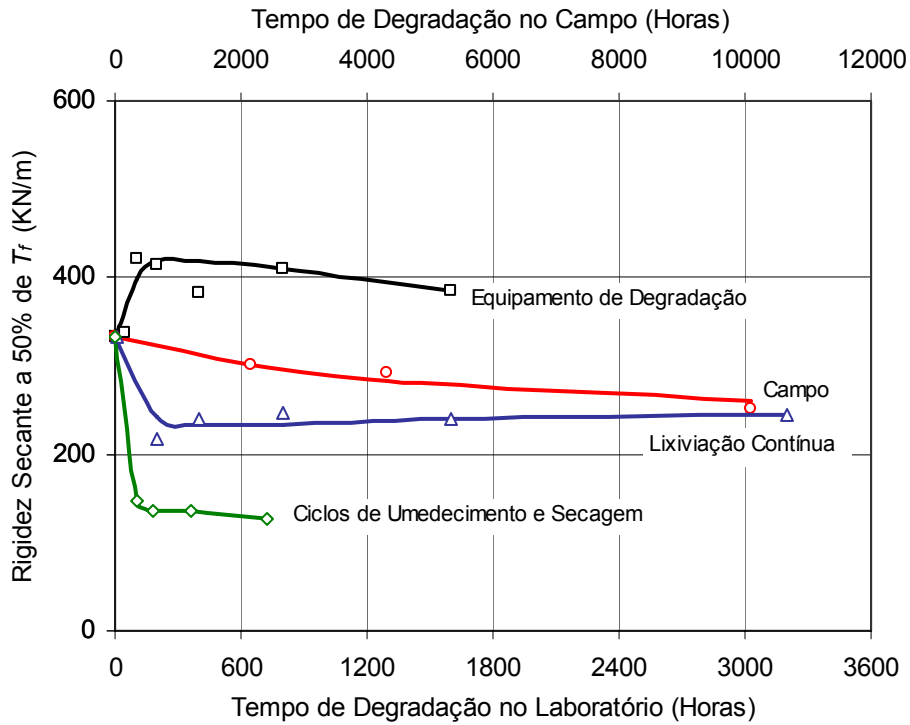


Figura 4.18. Rigidez Secante a 50% de  $T_f$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.

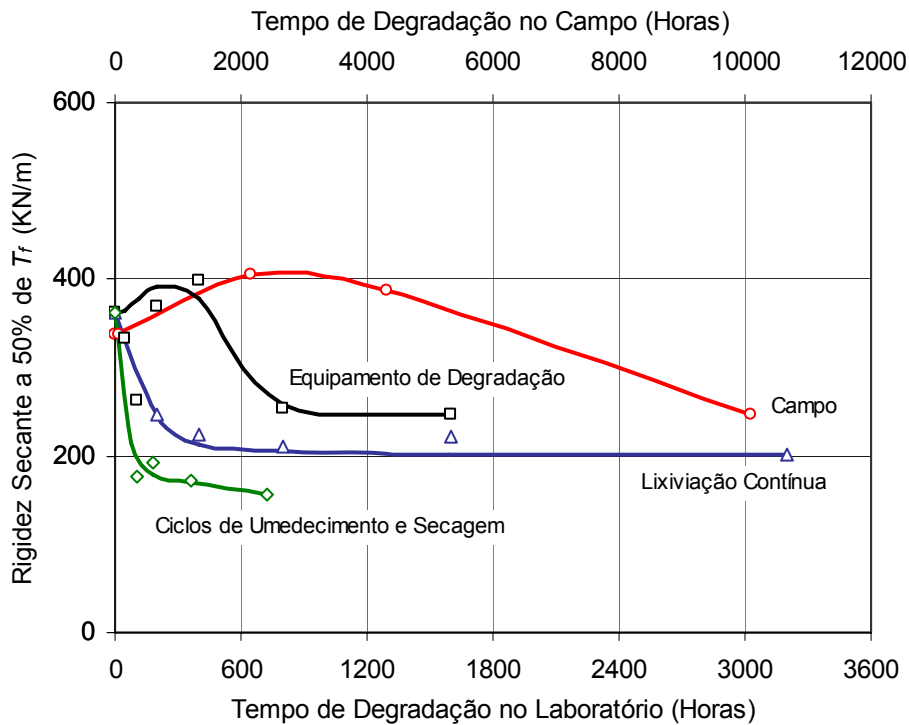


Figura 4.19. Rigidez Secante a 50% de  $T_f$  vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.

#### 4.5. RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO ESTÁTICO

Apresenta-se a seguir a análise dos resultados dos ensaios de resistência ao punçionamento estático realizado nos materiais de estudo. Faz-se, inicialmente, a apresentação dos resultados dos ensaios nos materiais degradados no equipamento implementado. Posteriormente, discute-se estes resultados com os resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

Os resultados dos ensaios de punçionamento estático para os geotêxteis degradados no equipamento implementado são apresentados na forma de curvas força de punçionamento vs. penetração. São apresentadas ainda as curvas força de punçionamento e penetração na ruptura vs. tempo de degradação, para diferentes níveis e procedimentos de degradação no campo e no laboratório.

##### 4.5.1. Curvas Força de Punçionamento vs. Penetração

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam as curvas força de punçionamento vs. penetração dos Geotêxteis A e B degradados no equipamento desenvolvido com diferentes intensidades de degradação.

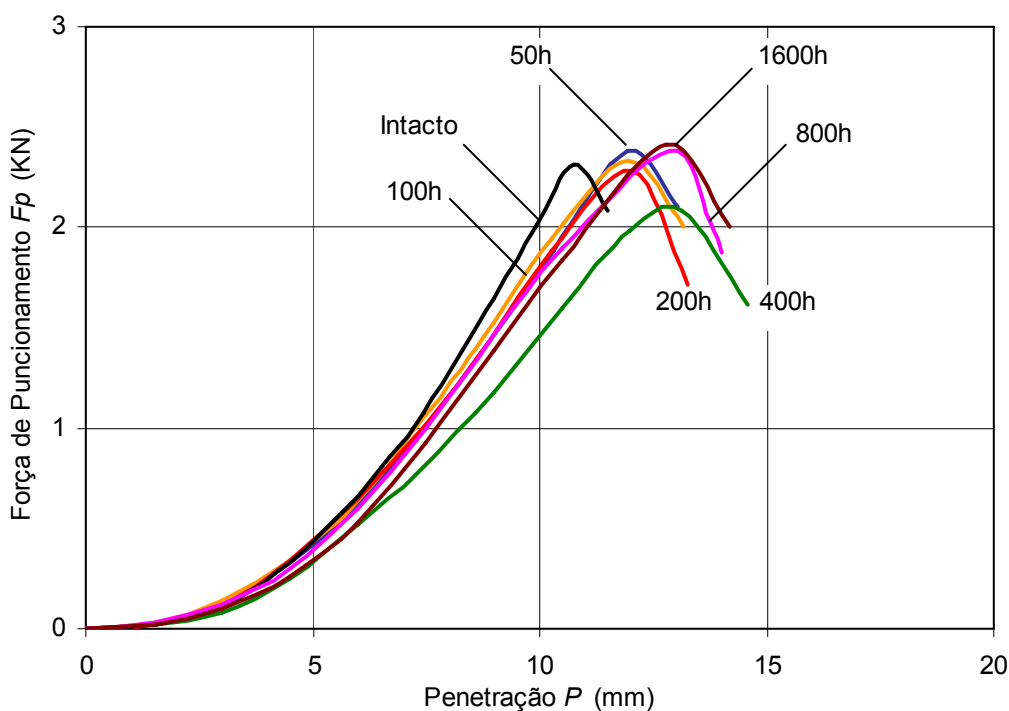


Figura 4.20. Força de punçionamento vs. penetração para diferentes níveis de degradação no equipamento, Geotêxtil A.

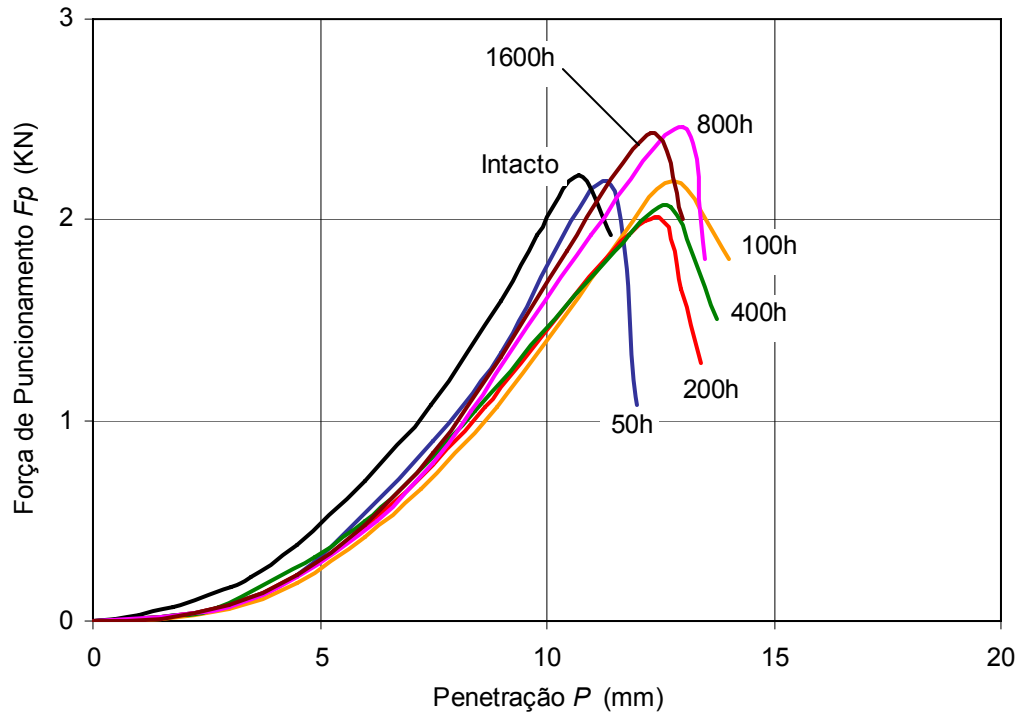


Figura 4.21. Força de puncionamento vs. penetração para diferentes níveis de degradação no equipamento, Geotêxtil B.

Nota-se que o comportamento dos geotêxteis quanto à força de puncionamento e penetração em diferentes níveis de degradação são significativamente influenciados pelo procedimento de degradação no equipamento implementado.

#### 4.5.2. Parâmetros dos Materiais Degradados

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os valores da força de puncionamento e penetração na ruptura  $F_{Pf}$  e  $P_f$ , para os diferentes tipos e intensidades de degradação, respectivamente. São apresentados também os coeficientes de variação de  $F_{Pf}$  e  $P_f$ .

Observa-se que os valores dos coeficientes de variação de  $F_{Pf}$  e  $P_f$  dos geotêxteis degradados no equipamento implementado são inferiores aos valores do material intacto.

Tabela 4.7. Resultado do ensaio de punção estático, Geotêxtil A.

Procedimento de Degradação	Nível de Degradação (h)	$F_{pf}$ (KN)	$CV_{Fpf}$ (%)	$P_f$ (mm)	$CV_{Pf}$ (%)
Intacto*	0	2,31±0,17	7,46	10,74±0,53	4,90
<i>Degradação Natural no Campo*</i>	2160	2,15±0,16	7,30	10,26±0,39	3,83
	4320	2,15±0,12	5,58	10,85±1,17	10,74
	10080	1,78±0,09	4,95	12,07±1,09	9,05
<i>Degradação por Lixiviação Contínua*</i>	200	2,24±0,19	8,38	12,83±0,58	4,50
	400	2,11±0,18	8,58	12,49±0,68	5,43
	800	2,29±0,04	1,77	13,31±0,04	0,30
	1600	2,14±0,12	5,68	13,32±0,16	1,23
	3200	2,19±0,19	8,80	13,33±0,68	5,11
<i>Degradação por Ciclos de Saturação e Secagem*</i>	100	2,90±0,15	5,24	15,67±0,64	4,11
	180	3,03±0,08	2,73	16,86±0,40	2,37
	360	1,90±0,50	26,42	13,62±1,62	11,86
	720	1,82±0,34	18,68	14,72±0,67	4,56
<i>Degradação no Equipamento de Degradação</i>	50	2,38±0,10	0,39	11,92±0,64	3,39
	100	2,33±0,18	1,38	11,95±0,40	1,36
	200	2,29±0,19	1,50	12,05±0,52	2,27
	400	2,08±0,14	0,95	13,11±0,81	4,99
	800	2,38±0,14	0,85	12,86±0,77	4,61
	1600	2,41±0,12	0,65	12,78±0,29	0,67

\* Resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

Tabela 4.8. Resultado do ensaio de punção estático, Geotêxtil B.

Procedimento de Degradação	Nível de Degradação (h)	$F_{pf}$ (KN)	$CV_{Fpf}$ (%)	$P_f$ (mm)	$CV_{Pf}$ (%)
Intacto*	0	2,22±0,23	10,23	10,67±0,68	6,34
<i>Degradação Natural no Campo</i>	2160	2,19±0,16	7,10	10,16±0,81	7,98
	4320	2,15±0,09	4,27	10,74±0,49	4,54
	10080	2,18±0,07	3,27	12,31±0,66	5,33
<i>Degradação por Lixiviação Contínua</i>	200	1,40±0,18	12,99	11,45±0,70	6,07
	400	1,21±0,08	6,45	10,31±1,10	10,71
	800	1,36±0,10	7,59	10,39±1,04	9,98
	1600	1,82±0,27	14,66	13,96±1,58	11,33
	3200	1,66±0,17	9,98	14,17±1,17	8,26
<i>Degradação por Ciclos de Saturação e Secagem*</i>	100	2,37±0,18	7,57	13,07±1,12	8,60
	180	2,30±0,27	11,78	13,66±1,26	9,19
	360	2,29±0,11	4,95	14,11±0,56	3,96
	720	2,10±0,19	8,96	14,38±0,80	5,56
<i>Degradação no Equipamento de Degradação</i>	50	2,19±0,18	1,50	11,32±1,32	15,35
	100	2,19±0,13	0,71	12,78±0,58	2,61
	200	1,99±0,18	1,71	12,15±1,00	8,27
	400	2,07±0,20	1,97	12,74±0,70	3,88
	800	2,47±0,05	0,10	13,00±0,51	1,97
	1600	2,43±0,13	0,67	12,31±0,61	3,02

\* Resultados obtidos por Cunha Pinto (2006).

### 4.5.3. Força de Puncionamento na Ruptura

As Figuras 4.22 e 4.23 apresentam as variações da força de puncionamento em diferentes níveis de degradação no campo e no laboratório para os geotêxteis estudados.

Observa-se que os valores da força de puncionamento na ruptura do Geotêxtil A (Figura 4.22) degradado no equipamento reduz para baixos níveis e aumenta para elevados níveis de degradação.

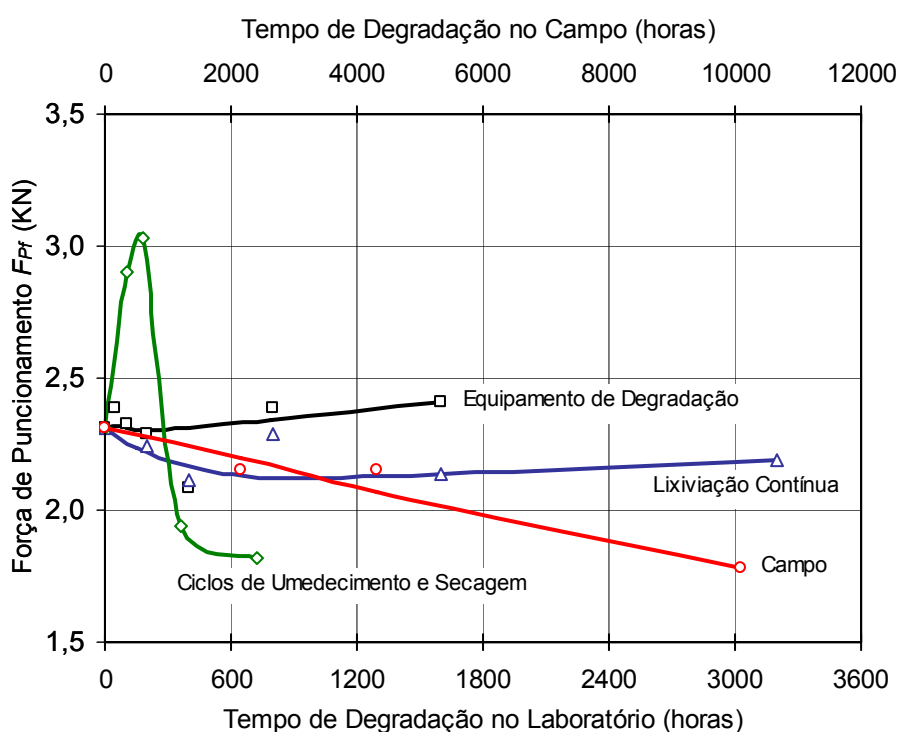


Figura 4.22. Força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.

No Geotêxtil A degradado no campo e no laboratório por ciclos de umedecimento e secagem e por lixiviação contínua, nota-se a redução da força de puncionamento para elevados níveis de degradação (Figura 4.22). A curva de degradação por ciclos de umedecimento e secagem do Geotêxtil A mostra o aumento inicial da força de puncionamento seguido de redução para elevadas intensidades de degradação.

No Geotêxtil B (Figura 4.23), observa-se que a força de puncionamento reduz para baixos níveis e aumenta para elevados níveis de degradação no equipamento.

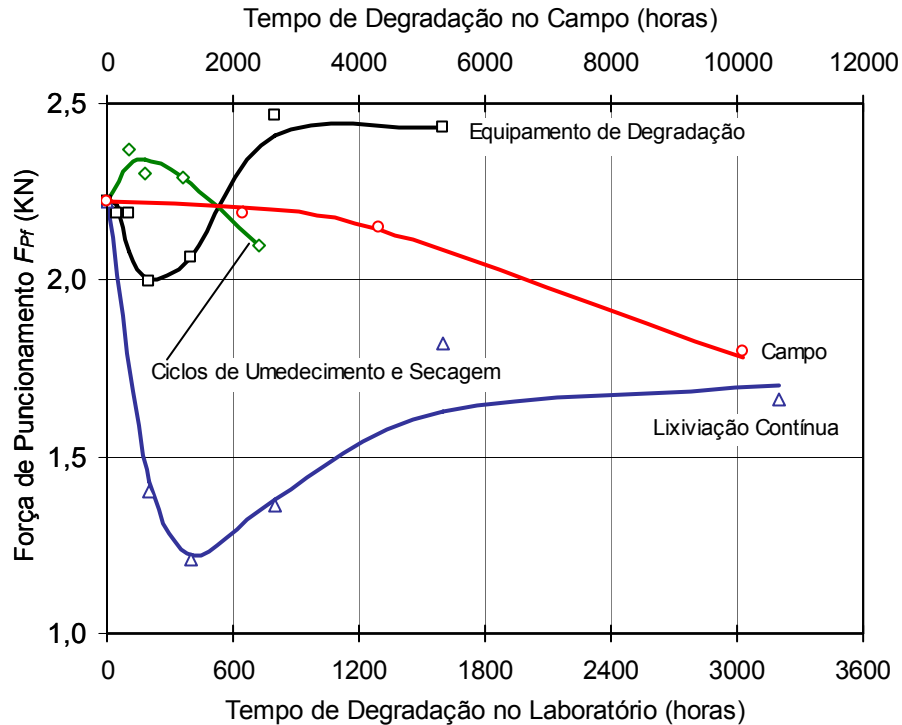


Figura 4.23. Força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.

Para o geotêxtil degradado no campo e no laboratório por ciclos de umedecimento e secagem e lixiviação contínua, observa-se a redução dos valores da força de puncionamento com a degradação.

Ressalta-se que a degradação no equipamento pode ser representativa da degradação no campo, se esta for comparada com o início da degradação causada no equipamento, onde se observa a redução dos valores da força de puncionamento nos geotêxteis.

Para avaliar a variação da força de puncionamento dos Geotêxteis A e B degradados no campo e no equipamento implementado, faz-se análise na fase inicial, correspondente a baixos níveis de degradação, onde nota-se a mesma tendência de variação da força de puncionamento dos Geotêxteis degradados no

campo, e no laboratório, por lixiviação contínua e através do equipamento implementado (Figuras 4.22 e 4.23).

#### 4.5.4. Penetração na Ruptura

As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam a variação da penetração na ruptura dos Geotêxteis A e B, degradados no campo e no laboratório, com a intensidade de degradação.

Os valores da penetração na ruptura para os geotêxteis degradados no campo e no laboratório tendem a aumentar com a degradação, em relação ao material intacto (Figuras 4.24 e 4.25).

Observa-se a mesma tendência de variação da penetração na ruptura dos Geotêxteis A e B degradados no campo e no laboratório (Figuras 4.24 e 4.25).

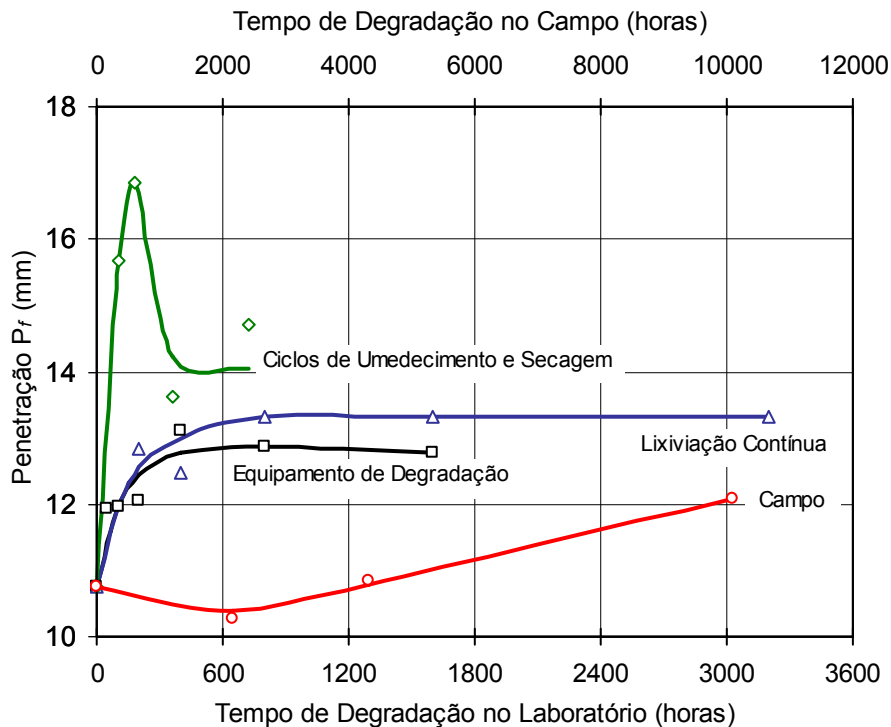


Figura 4.24. Penetração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.



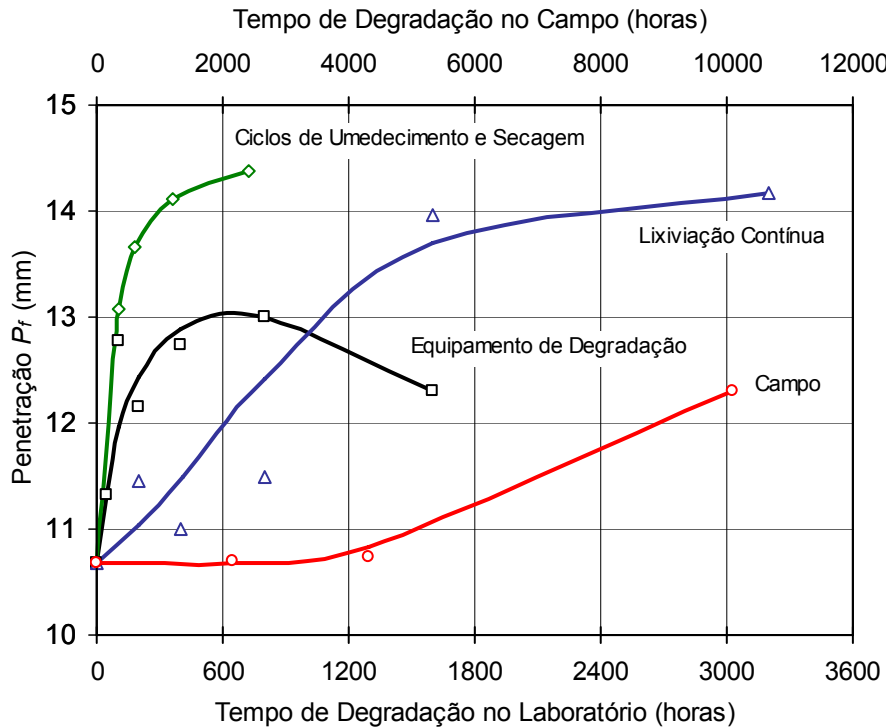


Figura 4.25. Penetração na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.

#### 4.6. RELAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE DEGRADAÇÃO NO CAMPO E NO LABORATÓRIO

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 degradado. Desta forma, estabelece-se uma equação geral que representa o índice de degradação do material  $I$ , expressa da seguinte forma:

$$I = \frac{|x - x_0|}{y} \times 100\% \quad \text{Equação 4.1}$$

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).

Nesta pesquisa determina-se o índice de degradação da força de funcionamento  $IF_{Pf}$  dos Geotêxteis A e B degradados no campo, e no laboratório, por ciclos de umedecimento e secagem, por lixiviação contínua e através do equipamento de degradação. Este índice de degradação foi utilizado por Cunha Pinto (2006) para avaliar o comportamento a longo prazo do Geotêxtil A. O índice de degradação  $IF_{Pf}$  é definido na Equação 4.2:

$$IF_{Pf} = \frac{|F_{Pf} - F_{P0}|}{F_{P0}} \times 100\% \quad \text{Equação 4.2}$$

As Figuras 4.26 e 4.27 ilustram as variações dos índices de degradação com os tempos de degradação no campo e no laboratório. Nestas figuras são apresentados os valores experimentais e as curvas ajustadas. A determinação das curvas ajustadas procurou definir uma tendência monotônica.

A representatividade dos procedimentos de degradação está relacionada à similaridade da variação dos índices de degradação no campo e no laboratório, além da proximidade entre os índices máximos.

Neste sentido, numa análise geral dos dados pode-se constatar que a degradação do Geotêxtil A (Figura 4.26) por ciclos de umedecimento e secagem é o procedimento mais representativo da condição de degradação no campo.

No Geotêxtil B (Figura 4.27), o procedimento de ensaio mais representativo das condições de campo é o de lixiviação contínua.

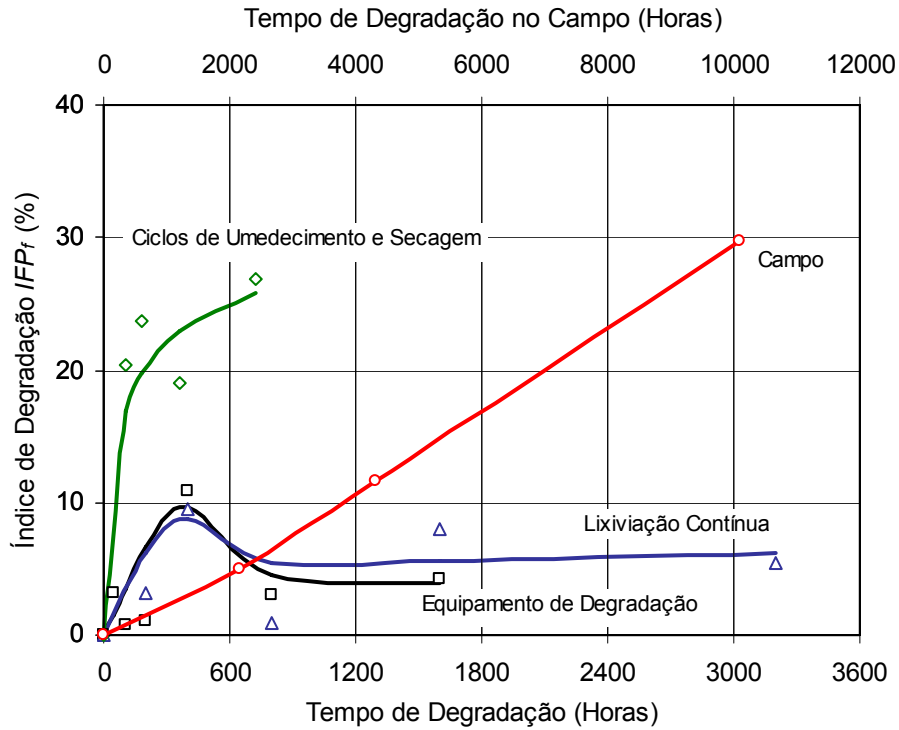


Figura 4.26. Índice da força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil A.

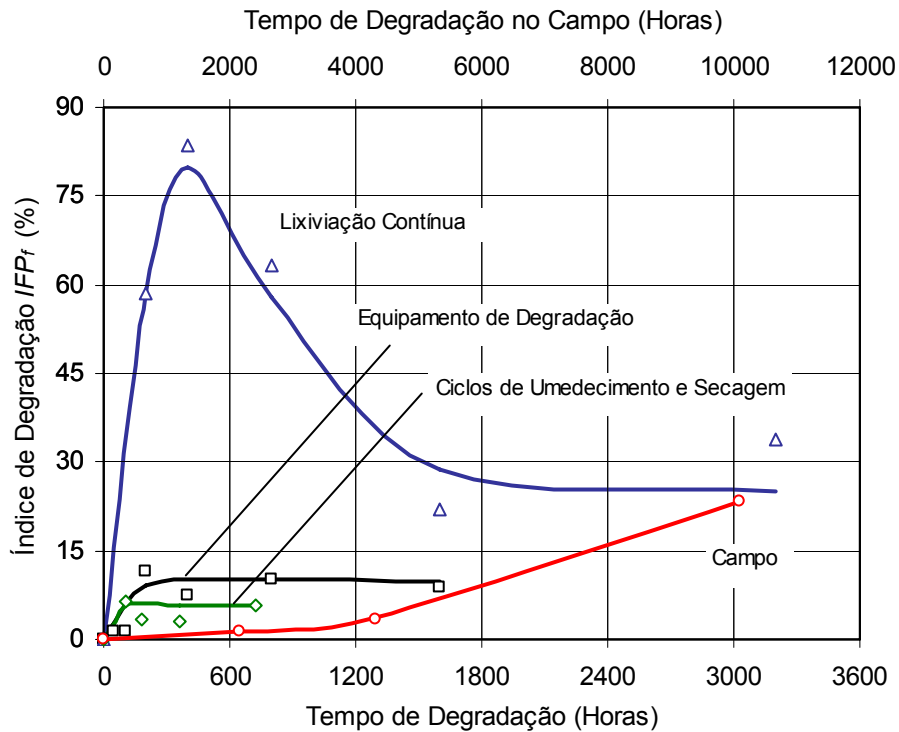


Figura 4.27. Índice da força de puncionamento na ruptura vs. tempo de degradação no campo e no laboratório, Geotêxtil B.

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 4.28). 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.

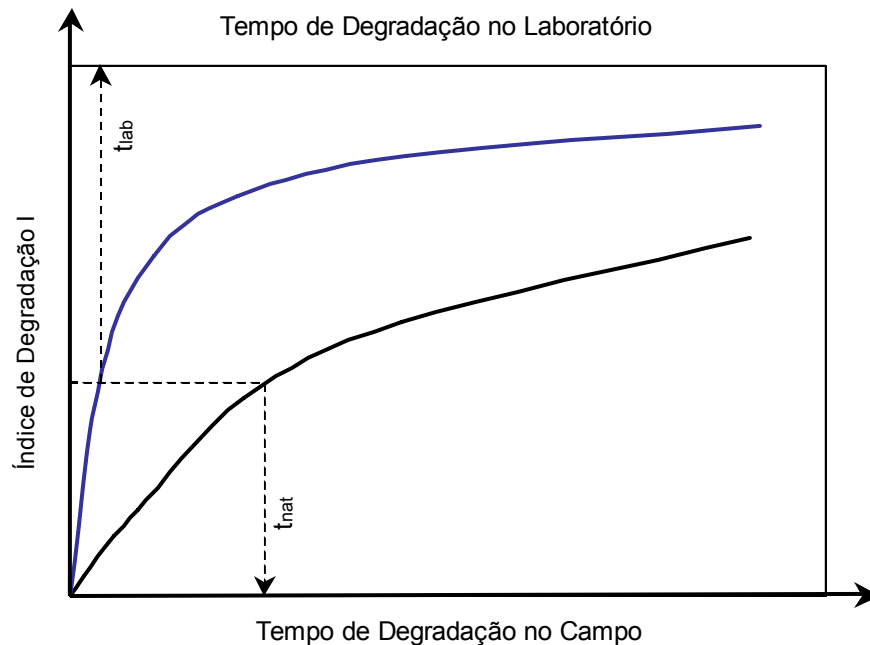


Figura 4.28. Relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório para um mesmo valor do índice de degradação.

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam a relação entre o tempo de degradação no campo e o tempo de degradação no laboratório para a força de puncionamento na ruptura dos Geotêxteis A e B.

Observa-se que no Geotêxtil A (Figura 4.29), a relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório pelos procedimentos de lixiviação contínua e através do equipamento de degradação são similares. Ressalta-se que a relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório, por lixiviação contínua e no equipamento implementado foi feita considerando apenas a fase inicial de degradação.

No Geotêxtil B (Figura 4.30), nota-se a similaridade do tempo de degradação no campo e no laboratório entre os procedimentos de degradação no equipamento implementado e por ciclos de umedecimento e secagem. No entanto, a relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório, por ciclos de umedecimento e secagem e no equipamento implementado foi feita considerando apenas a fase inicial de degradação.

Dos resultados apresentados observa-se que os tempos máximos de degradação no campo e o no equipamento implementado não são coincidentes. Pode-se concluir que não é possível fazer a extrapolação dos resultados para prever o comportamento destes materiais em longo prazo, utilizando os valores da força de puncionamento como parâmetro.

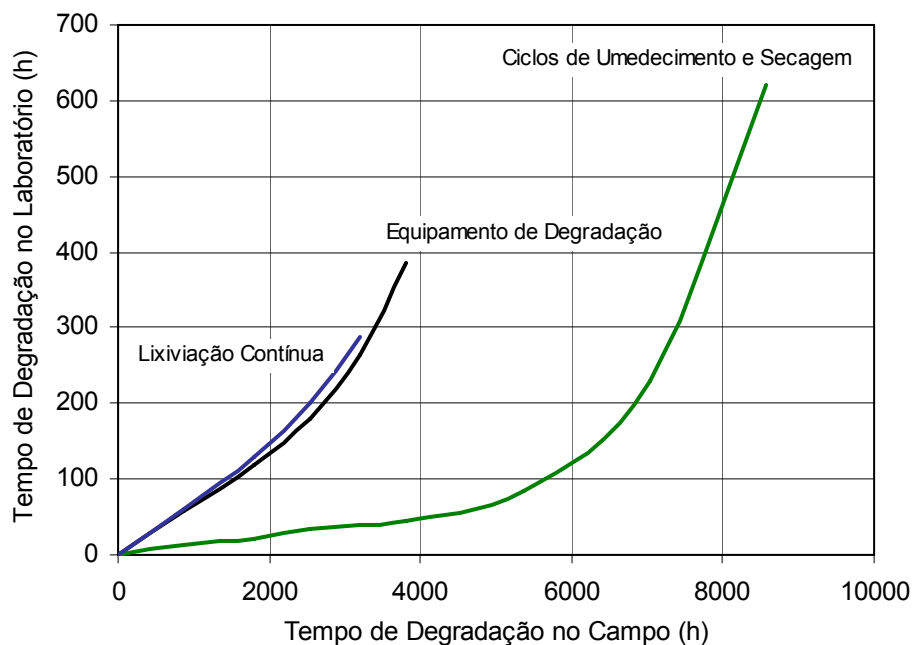


Figura 4.29. Relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório pelo índice de degradação da força de puncionamento na ruptura para diferentes procedimentos de degradação, Geotêxtil A.

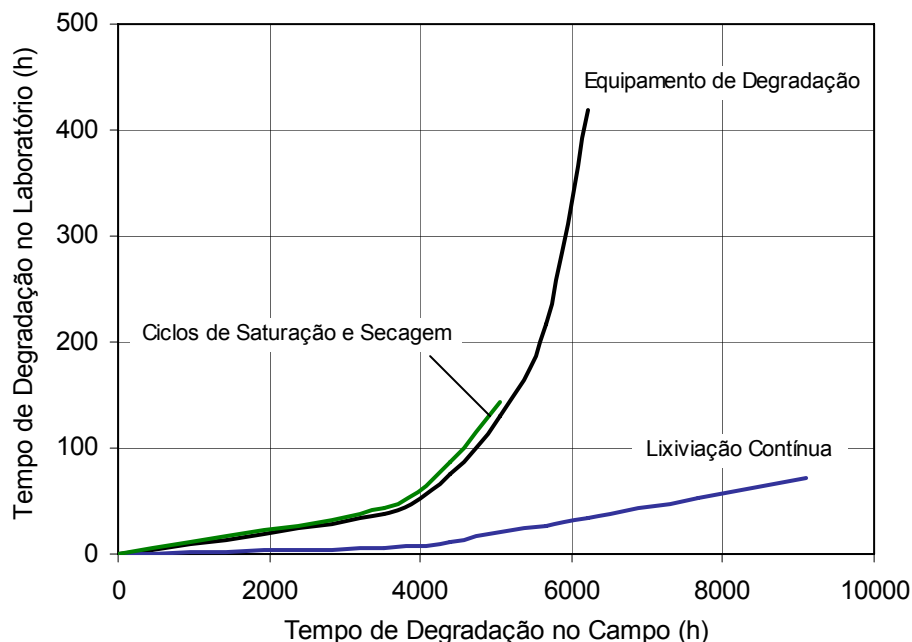


Figura 4.30. Relação entre o tempo de degradação no campo e no laboratório pelo índice de degradação da força de punção na ruptura para diferentes procedimentos de degradação, Geotêxtil B.

#### 4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados e discussões das análises feitas para a caracterização do material de estudo através de microscopia ótica, espectrometria dispersiva de raios-X, resistência à tração não-confinada e ao punção estático.

Verificou-se o comportamento do material de estudo quando submetido à degradação no campo e no laboratório por diferentes processos de degradação.

Na análise dos Geotêxteis por microscopia ótica, observou-se uma sensível dilatação das fibras do geotêxtil em elevados níveis de degradação, provocando a compressão das fibras na região do entrelaçamento promovendo uma pequena retração dos geotêxteis.

Foi observado na análise por espectrometria dispersiva de raios-X uma mudança na estrutura molecular da cadeia polimérica com o tempo de degradação nos Geotêxteis A e B.

A tendência de variação da carga de tração na ruptura dos geotêxteis degradados no campo ou no laboratório mostrou-se similar.

Observou-se a redução da carga de tração e o aumento da deformação na ruptura com o aumento do nível de degradação. Isto sugere uma tendência à fragilidade dos geotêxteis com o aumento da intensidade de degradação.

Ressalta-se que a variação da rigidez do Geotêxtil A degradado no equipamento não é representativa das condições de degradação no campo. No entanto, para o Geotêxtil B degradado no equipamento e no campo, na fase inicial de degradação, e degradados no equipamento e por lixiviação contínua na fase final de degradação observa-se a mesma tendência de variação das rigidezes.

A tendência de variação da força de puncionamento dos geotêxteis degradados no equipamento pode ser representativa da degradação no campo, se esta for comparada com o início da degradação causada no equipamento, onde se observa a redução dos valores da força de puncionamento no geotêxteis.

Nos geotêxteis degradados no campo e no laboratório, observa-se a mesma tendência de variação da penetração na ruptura.

No estudo do comportamento dos geotêxteis em longo prazo, observa-se que os tempos máximos de degradação no campo e no equipamento implementado não são coincidentes. Pode-se concluir que não é possível fazer a extrapolação dos resultados para prever o comportamento destes materiais a longo prazo, utilizando os valores da força de puncionamento como parâmetro.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

Esta pesquisa tem como objetivo o estudo da degradação de dois geotêxteis através de procedimentos especiais de laboratório utilizando o equipamento de degradação de grandes dimensões implementado, sendo para tanto executado amplo programa experimental, visando a determinação das variações das propriedades físicas, químicas e mecânicas dos geotêxteis após degradação. A seguir são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

### **5.1. QUANTO AO EQUIPAMENTO DE DEGRADAÇÃO**

A implementação de um equipamento de degradação de grandes dimensões capaz de submeter amostras de grandes volumes a diferentes mecanismos de degradação concomitantemente mostrou-se satisfatória.

Verificou-se que os geotêxteis submetidos à degradação no equipamento implementado sofreram influência dos mecanismos de degradação mobilizados no processo de degradação.

### **5.2. QUANTO À METODOLOGIA UTILIZADA**

A metodologia utilizada para avaliar a degradação no campo e no laboratório mostrou-se eficiente para a obtenção dos parâmetros dos geotêxteis estudados. Ressalta-se que as dimensões dos corpos-de-prova dos ensaios de resistência à tração não-confinada e ao puncionamento estático foram as mesmas adotadas por Cunha Pinto (2006) para que fosse possível a comparação entre os resultados obtidos nas duas pesquisas.

### **5.3. QUANTO À MICROSCOPIA ÓTICA**

A análise por microscopia ótica mostrou que a estrutura física dos geotêxteis estudados é pouco afetada para baixos níveis de degradação. No



entanto, para elevados níveis de degradação observa-se uma sensível dilatação das fibras do geotêxtil.

#### **5.4. QUANTO À ESPECTROMETRIA DISPERSIVA DE RAIOS-X**

A análise por espectrometria dispersiva de raios-X mostrou que a estrutura química dos geotêxteis estudados é afetada pelo processo de degradação no equipamento implementado.

Observou-se a lixiviação de óxidos dos geotêxteis para baixos níveis de degradação. Ressalta-se que para elevados níveis de degradação ocorreu a concentração de óxidos nos geotêxteis estudados.

#### **5.5. 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 dos geotêxteis degradados no campo ou no laboratório.

Nota-se ainda que a redução da quantidade de aditivos altera a rigidez dos geotêxteis durante o procedimento de degradação.

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

A eficiência dos procedimentos de degradação acelerada é determinada pela velocidade com que se simula a condição natural de campo. Conclui-se que os procedimentos de degradação acelerada no laboratório tendem simular a degradação no campo. No entanto, ressalta-se que o procedimento de ciclos de umedecimento e secagem foi o procedimento mais agressivo.

## **5.6. QUANTO À RESISTÊNCIA AO PUNÇIONAMENTO**

De modo geral, ocorre a redução da força de punçionamento com a degradação, tanto no campo quanto no laboratório por ciclos de umedecimento e secagem e por lixiviação contínua nos dois geotêxteis.

Nos Geotêxteis A e B degradados no equipamento implementado, em baixos níveis de degradação, observa-se a mesma tendência de variação da força de punçionamento que a verificada para a degradação no campo.

Verifica-se a mesma tendência de variação da penetração na ruptura dos Geotêxteis A e B degradados no campo e no laboratório.

O procedimento de degradação por ciclos de umedecimento e secagem é o mais eficiente, pois com este necessita-se de períodos curtos de exposição do material à degradação acelerada no laboratório.

## **5.7. QUANTO À CORRELAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE DEGRADAÇÃO NO CAMPO E NO LABORATÓRIO**

Esta pesquisa mostrou que não existe uma relação linear e única que correlaciona os tempos de degradação no campo e no laboratório. Observa-se que as relações dependem do procedimento de degradação no laboratório e das características do material de estudo.

## **5.8. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

A partir dos resultados e análises do presente trabalho, são apresentadas algumas sugestões e recomendações que podem ser úteis para eventuais estudos sobre os temas abordados.

Sugere-se a avaliação da degradação utilizando o equipamento implementado em outros geossintéticos.

Recomenda-se o aumento do gradiente de temperatura utilizado para a lixiviação das amostras no equipamento implementado.

Deve-se obter amostras no campo e no equipamento implementado com maiores intensidades de degradação.

Como a degradação dos geotêxteis sofreu grande influência dos procedimentos de degradação para baixos níveis de degradação, sugere-se a obtenção de amostras com níveis menores de degradação que os obtidos nesta pesquisa, para avaliar detalhadamente o comportamento dos geotêxteis nestas condições.

Sugere-se a realização de procedimentos de degradação com mecanismos de degradação químicos e biológicos.

Deve-se avaliar os efeitos da degradação em corpos-de-prova exumados em casos de obras antigas ou em campos experimentais.

Finalmente, é recomendável a avaliação do efeito do clima na degradação dos geossintéticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2004). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1. ed. Editora Edgard Blücher.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1979). Determinação da Resistência ao Choque. Designação da norma: ABNT - MB 964/79.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1983). Material metálico revestido e não revestido – Corrosão por exposição à nevoa salina. Designação da norma: ABNT - NBR 8094/83.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles. Designação da norma: ABNT - NBR 6465/84.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992a). Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa. Designação da norma: ABNT - NBR 12696/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992b). Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem acelerada com etilenoglicol. Designação da norma: ABNT - NBR 12697/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992c). Materiais Inorgânicos – Determinação do Desgaste por Abrasão. Designação da norma: ABNT - NBR 12042/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992d). Rocha para revestimento - Análise Petrográfica. Designação da norma: ABNT - NBR 12768/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992e). Rochas para Revestimento – Determinação da Resistência ao Impacto do Corpo Duro. Designação da norma: ABNT - NBR 12764/92.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1993). Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga. Designação da norma: ABNT - NBR 12824 /93.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). Geotêxteis – Determinação da resistência ao puncionamento estático - Ensaio com pistão tipo CBR. Designação da norma: ABNT - NBR 13359/95.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997). Placas Cerâmicas para Revestimento. Especificação e Métodos de Ensaio. Anexo H: Determinação da Resistência ao Ataque Químico. Designação da norma: ABNT - NBR 13818/97.

- ABRAMENTO, M. (1995) Durabilidade e comportamento de longo prazo de geossintéticos – Parte 2: Durabilidade dos materiais. 2º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, ABMS, p. 226-235.
- AGNELLI, J. A. M. (1999) Curso sobre degradação, estabilidade e envelhecimento de polímeros. Associação Brasileira de Polímeros, 209p.
- AMORIM, L. V.; NEVES, G. A.; OLIVEIRA, R. A.; FERREIRA, H. C. (2001) Estudo da Expansão por Umidade (EPU) em Tijolos Cerâmicos Provenientes de Edifícios em Alvenaria com Falência Estrutural. Florianópolis.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (1963). Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulphate or Magnesium Sulphate. ASTM Test Designation: C 88-63.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (1987). Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks. Repealed 1992. ASTM Test Designation: D 4644/87.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (1996). Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure. Test Designation: D 5970/96.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (1998). Performing Accelerated Outdoor Weathering of Nonmetallic Materials Using Concentrated Natural Sunlight. Test Designation: G 90-98.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2002). Deterioration of Geotextiles by Exposure to Light, Moisture and Heat in a Xenon Arc Type Apparatus. Test Designation: D 4355/02.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2004a). Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Non-Metallic Materials. Test Designation: G 155/04.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (2004b). Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials. Test Designation: G 154/04.
- BARROSO, E. V.; CORREA, B. R. N.; OLIVEIRA, L. S.; SILVA, L. C. T. (2005). Avaliação da Alteração das Rochas de Cantaria em Prédios Históricos: O Exemplo do Teatro Municipal do Rio de Janeiro. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 7p.
- BECERRA, J. E. B.; COSTA, A. G. (2005). Avaliação do Grau de Oxidabilidade de Rochas Graníticas com Aplicação Ornamental. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 7 p.
- CALLISTER, J. R. (2002). **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. Quinta Edição. LTC. Rio de Janeiro, Brasil, 589p.
- CAZZUFI, D.; FEDE, L.; VILLA, C.; MONTANELLI, F.; RIMOLDI, P. (1995). The Assessment of the Effects of Natural and Lab Weathering Exposure of

- Geosynthetics. Proceedings Sardinia 95, Fourth Landfill Symposium, S. Margherita Di Pula, Cagliari, Italy, pp. 387-396.
- COMER, A. I.; HSUAN, Y. G.; KONRATH, L. (1998). The Performance of Flexible Polypropylene Geomembranes in Covered and Exposed Environments. Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, USA, pp. 359-364.
- CROSTA, G. (1998). Slake Durability Vs Ultrasonic Treatment for Rock Durability Determinations. Technical Note. Pergamon, vol. 35, p. 815-824.
- CUNHA PINTO, V. (2006). **Estudo da Degradação de Geotêxteis Tecidos**. Dissertação de Mestrado. Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, RJ, 133p.
- DHAKAL, G.; YONEDA, T.; KATO, M.; KANEKO, K. (2002). Slake Durability and Mineralogical Properties of Some Pyroclastic and Sedimentary Rocks. Engineering Geology, vol. 65, p. 31-45.
- ELIAS, V.; SALMAN, A.; JURAN, I.; PEARCE, E.; LU, S. (1999). Testing protocols for oxidation and hydrolysis of geosynthetics. Federal Highway Administration, Washington, Report No. FHWA – RD – 97 – 144, 200p.
- EN - EUROPÄISCHE NORM. (1996). Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates. Part 1: Determination of the Resistance to Wear (Micro-Deval). Bruxelles, Test Designation: EN 1097-1.
- FARJALLAT, J. E. S. (1971). Estudos Experimentais Sobre Desagregação do Basalto Compacto Usado no Enrocamento do Aterro da Ponte do Rio Sucuriú. 1ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, São Paulo, v.3, tema 3, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Publicação 902, 9p.
- FARJALLAT, J. E. S. (1972). Relato sobre o Tema: Desagregabilidade de Rochas e Problemas Relativos à sua Aplicabilidade. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, ABGE, São Paulo, vol. II A, pp. 19-53.
- FARJALLAT, J. E. S.; DE BARROS, F. P.; YOSHIDA, R.; DE OLIVEIRA, J. A. N. (1972). Alguns Problemas de Desagregação dos Basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, ABGE, São Paulo, vol. II A, pp. 73-102.
- FAYOUX, D.; GOUSSE, F.; RUMMENS, F. (1993). Assessment on a PVC Geomembrane in a Landfill After Ten Years. Proceedings Sardinia 93, pp. 369-378.
- FOOKES, P. G.; GOURLEY, C. S.; OHIKERE, C. (1988) Rock Weathering in Engineering Time. Quarterly Journal of Engineering Geology, London, vol. 21, p. 33-57.
- FRAZÃO, E. B.; CARUSO, L. G. (1983) Síntese do Conhecimento sobre Alterabilidade de Rochas Basálticas como Material de Construção em Algumas Barragens da Bacia do Alto Paraná. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, ABMS, vol. II A, São Paulo, SP, p. 21-33.

- FRAZÃO, E. B. (1993). **Metodologia para Avaliação da Alterabilidade de Rochas a Partir de Estudo Experimental em Amostras de Basalto da U.H.E. de Três Irmãos**. Tese de Doutorado, Escola de Eng. de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 175 p.
- GOODMAN, R. E. (1989). **Introduction to Rock Mechanics**. John Wiley & Sons, second edition, New York.
- HSUAN, Y. G.; GUAN, Z. (1998) Antioxidant Depletion During Thermal Oxidation of High Density Polyethylene Geomembranes. Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, March. Industrial Fabric Association International, St Paul, N, USA, pp. 375-380.
- HUESKER (2003). Catálogo de especificações de produtos. <http://www.huesker.com>
- HYPOLITO, R.; VALARELLI, J. V. (1972). Alteração Experimental de Diabásios. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, ABGE, São Paulo, pp. 103-122.
- ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. (1981). Rock Characterization Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods, Ed. E.T. Brow, Pergamon Press, Oxford, pp.1-212.
- KOERNER, G. R.; HSUAN, G. Y.; KOERNER, R. M. (1998). Photo-initiated Degradation of Geotextiles. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 124 (12), pp. 1159-1166.
- KOPPE, J. C.; ZINGANO, A. C.; COSTA, J. F. C. L. (2005). Alterabilidade de Rochas Ornamentais, a Importância das Propriedades Tecnológicas na Seleção de Revestimentos Externos. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- LADEIRA, F. L.; MINETTE, E. (1984). Índices Geomecânicos de Alteração na Quantificação da Alterabilidade de Rochas. 4º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, ABGE, Belo Horizonte, 4p.
- LIMA, M. A. B.; NOGUEIRA NETO, J. A.; ARTUR, A. C. (2005). Simulações da Alterabilidade de Granitos em Áreas Litorâneas. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 8 p.
- LODI, P. C.; BUENO, B.S. (2004). Degradação térmica de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto do vinila) (PVC). GEO-JOVEM 2004 – 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 5 p.
- MAIA, P.C.A. (2001). **Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, 351p.
- MAIA, P.C.A.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S; ANTUNES, F. S. (2002). Alterabilidade de Rochas Basálticas - Caracterização Petrográfica. Solos e Rochas, ABMS/ABGE, vol.25, no. 3, pp. 207-220.

- MAIA, P.C.A.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S (2003). Alterabilidade de Rocha Basáltica - Caracterização Mecânica. Solos e Rochas, ABMS/ABGE, vol.26, no. 3, pp. 205-215.
- MAIA, P.C.A.; PINHEIRO, A. D.; ALEXANDRE, J. (2003a) Estudo da Alteração de Cerâmicas Vermelhas pela Exposição aos Raios Solares e Variações de Umidade. 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa-PB, 9 p.
- MAIA, P.C.A.; ALEXANDRE, J.; RAMOS, B. M. G. (2003b) Avaliação do Desgaste para Previsão da Durabilidade de Cerâmicas Vermelhas. 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa-PB, 10 p.
- MATHEUS, E. (2002). **Efeitos do Envelhecimento Acelerado e do Dano Mecânico Induzido no Desempenho e Durabilidade de Alguns Geossintéticos.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 323p.
- MATOS, L. F. S.; ROCHA, J. C. (2005). Caracterização da Alterabilidade do Mármore Camboriú-SC. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- MATTOS, I. C.; ARTUR, A. C.; NOGUEIRA NETO, J. A. (2005). Influência da Mineralogia e Textura na Alterabilidade de Granitos Ornamentais do Stock Serra do Barriga, Sobral/CE. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- MESQUITA, M. P. S; ARTUR, A. C. (2005). O Granito Branco Ceará e sua Resistência ao Ataque de Substâncias Químicas Agressivas – I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- MINETTE, E. (1982). **Quantificação Geomecânica e de Alterabilidade de um Diorito.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Eng. Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 243 p.
- MONTANELLI, F.; RIMOLDI, P. (1995). Thermo-Oxidation resistance of polyolefin geogrids. Geosynthetics '95 Conference Proceedings, Nashville, Tennessee, USA, pp. 1003-1016.
- NAVARRO, R. F. (2001). **Materiais e Ambiente.** Editora Universitária João Pessoa. João Pessoa, Brasil, 180p.
- PANDOLPHO, J. R.; GUIMARÃES, D. G. (1995). Durabilidade de geotêxteis de poliéster expostos ao intemperismo, 2º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, ABMS, São Paulo, Brasil.
- PETRUCCI, E. G. R. (1999). **Materiais de Construção.** 11ª Edição. Editora Globo. São Paulo, Brasil, 435p.
- PHILIPP, R. P.; BENEDETTI, V. D. (2005). Análise e Avaliação dos Problemas na Cúpula da Catedral Metropolitana de Porto Alegre, RS: Problemas de Execução do Projeto e/ou Material Inadequado?. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 6 p.



- PINHEIRO, A. D.; MAIA, P.C.A. (2004). Avaliação da Durabilidade de Materiais Cerâmicos Vermelhos. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6p.
- RENNER, L. C.; PULZ, G. M. (2005). Comparação e Interpretação dos Ensaios Tecnológicos dos Granitóides Jaguari e Santa Rita, Porção Sudoeste do Escudo-Subriograndense. I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5p.
- RIBEIRO, J. (2002). **Estudo da substituição de  $TiO_2$  por  $Ta_2O_5$  em eletrodos binários de óxido de rutênio: Preparação, caracterização eletroquímica e investigação estrutural e morfológica.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Química, Universidade de São Paulo, SP, 99p.
- SALLES, R. O.; MAIA, P. C. A. (2004). Avaliação Experimental da Alterabilidade de Rochas Ornamentais do Norte do Estado do Rio de Janeiro. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6p.
- SANTIAGO, L. O. R.; MARQUES, E. A. G.; BOTELHO, B. S.; RODRIGUES, W.; COSTA, T. A. V. (2004). Correlações entre o Grau de Alteração, a Alterabilidade e a Resistência à Compressão, para um Filito Sericítico. I Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6p.
- SILVA, M. E.; COSTA, A. G. (2005). Alterabilidade em Esteatitos – Resistência ao Ataque Químico– I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 5 p.
- SUITS, L. D.; HSUAN, Y. G. (2003). Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer. Geotextiles and Geomembranes, vol. 21, p. 111-122.
- TORQUATO, M. F. B.; FIGUEIREDO, C.; FIGUEIREDO, P.; TORQUATO, J. R.; BARROS, L. A. A.; MACHAQUEIRO, P. (2005). Análise de Imagem Aplicada ao Granito Meruoca Clássico, Mediante Envelhecimento Artificial em Câmara Saturada com  $SO_2$  – I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari-ES, 7 p.
- VALINHO, R. F.; PINTO, V. C.; MAIA, P. C. A.; FERREIRA V. A. S. (2004) Avaliação qualitativa de diferentes tipos de geossintéticos. GEO-JOVEM 2004 – 1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, São Carlos-SP, ABMS, 6 p.
- VINK, P.; FONTIJN, H. F. N. (2000). Testing the Resistance to Oxidation of Polypropylene Geotextiles at Enhanced Oxygen Pressures. Geotextiles and Geomembranes, vol. 18, p. 333-343.