

**Tese apresentada à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências no Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Infra-Estrutura de Transportes**

**Renato Satoshi Trentini**

**ANÁLISE DA SINERGIA ENTRE FATORES DE  
REDUÇÃO EM GEOSSINTÉTICOS SUBMETIDOS A  
ESFORÇOS DE TRAÇÃO**

**Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:**



Prof.<sup>a</sup>. Dra. Delma de Mattos Vidal  
Orientadora

Prof. Dr. Homero Santiago Maciel  
Chefe da Divisão de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP - Brasil  
2005

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

**Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA**

<p>Trentini, Renato Satoshi Análise da sinergia entre fatores de redução em geossintéticos submetidos a esforços de tração / Renato Satoshi Trentini. São José dos Campos, 2005. 123f.</p> <p>Tese de mestrado – Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Infra-Estrutura de Transportes – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. Orientadora: Dra. Delma de Mattos Vidal.</p> <p>1. Geossintéticos. 2. Tereftalato de polietileno. 3. Análise de fluência. 4. Hidrólise. 5. Polímeros. 6. Ensaio de materiais. 7. Mecânica dos solos. 8. Geotecnia. 9. Engenharia civil. I. Centro Técnico Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica. II. Título.</p>
---

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA –**

TRENTINI, Renato Satoshi. Análise da sinergia entre fatores de redução em geossintéticos submetidos a esforços de tração. 2005. 123f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS –**

Renato Satoshi Trentini

Análise da sinergia entre fatores de redução em geossintéticos submetidos a esforços de tração

Tese / 2005

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Renato Satoshi Trentini

SHIS QI 17 conj. 15 casa 23 – Brasília/DF

**ANÁLISE DA SINERGIA ENTRE FATORES DE  
REDUÇÃO EM GEOSINTÉTICOS SUBMETIDOS A  
ESFORÇOS DE TRAÇÃO**

**Renato Satoshi Trentini**

Composição da Banca Examinadora:

Maryangela Geimba Lima  
Delma de Mattos Vidal  
Benedito de Souza Bueno  
Paulo Ivo Braga de Queiroz  
Vera Lúcia Lourenço

Presidente – ITA  
Orientador – ITA  
USP / EESC  
ITA  
IAE

**ITA**

*Dedico este trabalho aos meus pais Laércio e Hiromi, avôs e avós, aos meus irmãos e irmãs, sobrinho e sobrinhas. Tudo devo a vocês que são minha fonte de inspiração, orgulho e certeza de amor incondicional.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de poder colocar neste pequeno espaço meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que tornaram possível, mesmo que indiretamente, a concretização deste trabalho. Mas, infelizmente não posso! Deus me deu um dom que é o de *fazer amigos*! Amigos verdadeiros e em grande quantidade. Com certeza, todos deram sua contribuição e têm minha eterna gratidão.

Porém não há como deixar de registrar o meu “**muito obrigado**” à minha orientadora **Delma**, exemplo de pessoa, caráter e profissionalismo, dona de uma simpatia ímpar e que nunca deixou de acreditar e me ajudar mesmo quando tudo parecia não ter fim; igualmente agradeço ao professor **PI**, ícone do conhecimento e companheirismo, ao professor **Akio**, pelos ensinamentos de computação e bolachinhas diárias, demais professores do departamento e aos professores **Vera Lucia Lourenço**, **Benedito Bueno** e **Maryangela Lima** pela participação e contribuição na defesa. **Guilherme** e **Reinaldo**, meu “obrigadão” pela força e pelas risadas no laboratório. **Diana**, **Fabio** e **Cris** (IAE – AMR), agradeço aos “jeitinhos” dados, conselhos e ajuda.

Agradeço, também, a todos os amigos do “corredor da infra”, em especial à **Paula (Paulin)**, **Renatinha**, **Nathalia (Ricardo e Ricardinho** também, é claro), **Ferrugem** (e toda família **Camargo**), **Viviane**, **Heloisa (Heron)**, **Michela**, **Cláudio**, **Catarina**, **Bárbara**, **Betânia**, **Renée**, **Vinicius**, **Heraldo**, **Cris**, **Ketnes**, **Marcus (Byra)**, **Mariana (e Krolzinha)**, **Auner**, **Denilson**, **Nadiane (Sra Kruk)**, **Claudia** e os gaúchos (**Erik**, **Aislan**, **Fernando**, **Elemar** e **Rui**);

Finalizando, não poderia deixar de fora neste agradecimento, a “*galera do pólo*” (“*brigar para desestressar*”), os companheiros do **HTO**, em especial os que mais me aturaram (**Osvandre**, **mineirinho**, **Higor**, **Claus**, **Luizão**, **Amandita**, **Giovana** e **Eliana**), a **CAPES**, pelo suporte financeiro e a minha querida **Branca** que, com carinho e fé, esteve presente no começo e fim desta caminhada.

## RESUMO

As perdas de resistência à tração dos geossintéticos, com o decorrer da vida útil, são consideradas, ainda nos projetos, através dos Fatores de Redução Parciais (FRp). Esses valores são obtidos por meio de ensaios que contemplam, isoladamente, os diversos tipos de degradação a que esses elementos possam ser expostos. A metodologia convencional sugere que a resistência a tração do geossintético, no tempo de projeto, seja dada pela resistência à tração característica dividida pelo produto de todos os FRp e um fator de segurança (FS) relativo à extrapolações, sinergias, etc. Neste conceito, pouco se conhece a respeito da sinergia entre os FRp e, ao assumir valores empíricos, há o risco de incorrer em um sobredimensionamento ou, por outro lado, desfavorecer a segurança da obra.

Este trabalho discute a sinergia entre os FRp aplicados aos geossintéticos em obras de reforço. A revisão bibliográfica alerta para o efeito dos danos de instalação no comportamento em longo prazo, mostrando a necessidade de rever a atual metodologia de cálculo utilizada. O efeito sinérgico entre a hidrólise e a fluência em filamentos de PET é debatido e o estudo complementado através de ensaios. As análises de ruptura por fluência e ataque químico em solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  com pH 12 foram realizadas em uma primeira etapa, separadamente e, posteriormente, de forma associada, em ensaio especificamente desenvolvido para esta pesquisa.

Os resultados dos ensaios combinados revelam um efeito sinérgico implicando em perdas de resistência superiores àquelas calculadas em função das respostas das análises isoladas. Problemas e sugestões relativas aos mecanismos e procedimentos de ensaios são, também, enfatizados.

## **ABSTRACT**

The tensile strength losses that occur in geosynthetics along its lifespan are often considered in geotechnical design by the adoption of Partial Reduction Factors (PRF). The values of these factors are obtained through tests that take into account each kind of geosynthetic degradation separately. This conventional approach suggests that geosynthetic tensile strength at design time may be calculated by dividing its characteristic tensile strength by the product of all PRF and by a safety factor (SF) due to synergy, extrapolations etc. However, little is known about the synergy among different PRF's, and by assuming empirical safety factors, one takes the risk of either producing an unsafe project or getting an expensive project.

This work discusses the synergy among PRF's when applied to reinforcement structures. The literature survey alerts to the effects of installation damages to the long term behavior of geosynthetics, showing the needs of revising the current design approach. The synergy between hydrolysis and creep degradation of PET filaments is discussed and its study is supplemented by laboratory tests. The creep failure and the chemical degradation by a solution of  $\text{Ca(OH)}_2$  at pH 12 were carried in separate in the initial laboratory tests. After that, a new testing procedure was developed in order to take into account both effects together.

The results of the laboratory tests showed a clear synergy between creep and chemical attack, as the tensile strength losses for specimens under both effects were larger than the sum of the losses caused by each effect separated. Problems and suggestions concerning testing procedures are also presented and discussed.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. PRODUTOS PARA APLICAÇÃO EM REFORÇO .....</b>	<b>18</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	18
2.2 OS GEOSSINTÉTICOS.....	18
2.2.1 <i>Introdução.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Geotêxteis .....</i>	<i>19</i>
2.2.3 <i>Geogrelhas.....</i>	<i>21</i>
2.3 OS POLÍMEROS.....	21
2.3.1 <i>Introdução.....</i>	<i>21</i>
2.3.2 <i>Estrutura Polimérica .....</i>	<i>22</i>
2.3.3 <i>Comportamento mecânico.....</i>	<i>26</i>
2.3.4 <i>Processo de fabricação.....</i>	<i>29</i>
2.4 POLIESTER – POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) .....	31
<b>3. COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO.....</b>	<b>35</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 GEOSSINTÉTICOS COMO ELEMENTO DE REFORÇO .....	36
3.2.1 <i>Introdução.....</i>	<i>36</i>
3.2.2 <i>Propriedades Características .....</i>	<i>37</i>
3.2.3 <i>Fatores de Redução .....</i>	<i>38</i>
3.3 OS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO.....	43
3.3.1 <i>Introdução.....</i>	<i>43</i>
3.3.2 <i>Fluência .....</i>	<i>43</i>
3.3.3 <i>Danos no processo de instalação .....</i>	<i>48</i>
3.3.4 <i>O Meio Ambiente .....</i>	<i>50</i>
3.3.5 <i>Sinergia.....</i>	<i>52</i>
3.4 CASOS DE ESTUDO DA SINERGIA ENTRE FATORES DE REDUÇÃO .....	52
3.4.1 <i>Billing et al. (1990).....</i>	<i>52</i>
3.4.2 <i>Viezee et al. (1990) e Krumm (1988).....</i>	<i>56</i>
3.4.3 <i>Allen &amp; Bathurst (1996) .....</i>	<i>58</i>
3.4.4 <i>Pinho-Lopes et al. (2000), Pinho-Lopes et al. (2002) e Pinho-Lopes &amp; Lopes (2004) .....</i>	<i>60</i>



3.4.5	<i>Schröer et al (2000) e Greenwood (2002)</i> .....	64
3.4.6	<i>East &amp; Rahman (1999) e Rahman &amp; Alfaro (2004)</i> .....	66
<b>4.</b>	<b>ESTUDO DA SINERGIA ENTRE OS FR<sub>FL</sub> E FR<sub>MA</sub> –ENSAIOS</b> .....	<b>73</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	73
4.2	SEQÜÊNCIA DE ENSAIOS.....	74
4.3	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	75
4.3.1	<i>Análises preliminares</i> .....	75
4.3.2	<i>Equipamento utilizado</i> .....	78
4.3.3	<i>Corpos-de-prova “virgens”</i> .....	79
4.3.4	<i>Corpos-de-prova Alterados (CPa)</i> .....	81
4.3.5	<i>Procedimento Adotado</i> .....	83
4.3.6	<i>Resultados preliminares</i> .....	84
4.4	ENSAIO DE FLUÊNCIA CONVENCIONAL.....	85
4.4.1	<i>Análises preliminares</i> .....	85
4.4.2	<i>As Cargas</i> .....	88
4.4.3	<i>Sistemas de leitura</i> .....	89
4.4.4	<i>Os Corpos-de-Prova</i> .....	90
4.4.5	<i>O equipamento e procedimento adotado</i> .....	90
4.5	ENSAIO DE FLUÊNCIA ASSOCIADA.....	93
4.5.1	<i>Análises preliminares</i> .....	93
4.5.2	<i>As Cargas</i> .....	95
4.5.3	<i>Os Corpos-de-Prova</i> .....	95
4.5.4	<i>Sistema de Leitura</i> .....	97
4.5.5	<i>Equipamento / Procedimento adotado</i> .....	97
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>102</b>
5.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	102
5.2	FLUÊNCIA CONVENCIONAL.....	105
5.3	FLUÊNCIA ASSOCIADA.....	107
5.4	ESTUDO DA SINERGIA .....	109
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS</b> .....	<b>113</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>117</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Temperatura de transição vítrea (Tg) e temperatura de fusão (Tm) de alguns dos polímeros mais comuns (Mano & Mendes 1999 ) .....	29
Tabela 2.2 – Processos de fabricação de artefatos poliméricos(Mano & Mendes 1999) .....	31
Tabela 3.1– Recomendações de valores para Fatores de Redução Parciais mínimos (Vidal 2002).....	42
Tabela 3.2 – Fatores de redução recomendados por Koerner (1998) - (Adaptado) .....	42
Tabela 3.3 – Minerais, compostos, formulação e respectivos valores de pH (ISO/TR 13434 1998).....	51
Tabela 3.4 – Características mecânicas dos Geossintéticos utilizados no estudo. ....	53
Tabela 3.5 – Soluções químicas utilizadas. ....	55
Tabela 3.6 - Geossintéticos utilizados. ....	60
Tabela 3.7 - Fatores de redução devido aos danos de instalação e devido à fluência. ....	63
Tabela 3.8 – Fatores de Redução devido aos danos de instalação, à fluência e ao efeito combinado.....	66
Tabela 3.9 – Resultados das análises de redução na resistência à ruptura por tração e perda de massa – dados de East & Rahman (1999) para PET 1 em solução 10,1% de NaOH à temperatura ambiente. ....	69
Tabela 3.10 – Valores dos tempos relativos às prováveis rupturas em função da carga aplicada pré-imersão para as três considerações de análises. ....	72
Tabela 4.1 – Dados dos filamentos utilizados, segundo o fabricante.....	80
Tabela 4.2 – Composição química do CaO P.A. ( <u>Vetec Química Fina LTDA</u> ).....	82
Tabela 4.3 – Resumo dos resultados dos ensaios de tração em CPv.....	84
Tabela 4.4 – Valores das cargas correspondentes às porcentagens da carga máxima de ruptura. ....	89
Tabela 5.1 – Resistência à tração de filamentos virgens a velocidade de deformação de 25mm/min.....	103
Tabela 5.2 – Cargas, em gramas, referentes à porcentagens de $a_{max}$ .....	104
Tabela 5.3 – Cargas máximas na ruptura de corpos-de-prova submetidos à ataque químico	105
Tabela 5.4 – Tabela-resumo com os resultados dos ensaios de “fluência convencional“. ....	106
Tabela 5.5 – Fatores de redução relativos a fluência, meio ambiente e efeitos conjugados, para 1h, 5h, 10h, 50h e 100h.....	110

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Exemplo de geotêxtil tecido.....	20
Figura 2.2 – Exemplo de geotêxtil não tecido agulhado (zoom de 30x no detalhe).....	20
Figura 2.3 – Exemplo de geogrelha bidirecional.....	21
Figura 2.4- Desenho esquemático de uma molécula de polietileno (Demarquete 2001 - adaptado).....	22
Figura 2.5 – Representação de cadeias macromoleculares: (a) polímeros lineares, (b) polímeros ramificados e (c) polímeros reticulados (Demarquete 2001) .....	24
Figura 2.6 – Estrutura macromolecular dos polímeros. (a) estrutura amorfa; (b) Estrutura parcialmente amorfa (parcialmente cristalino); (c) microestrutura de um polímero semi-cristalino apresentando regiões cristalinas e amorfas (Demarquete 2001).....	25
Figura 2.7 – Estrutura macromolecular segundo modelo da micela franjada – (Crawford 1998) .....	26
Figura 2.8 – Estrutura macromolecular segundo modelo da cadeia dobrada – (Crawford 1998) .....	26
Figura 2.9– Representação esquemática do comportamento de uma massa polimérica resfriada submetida a um aumento gradual de temperatura (Lourenço et al 2003).....	28
Figura 2.10 - Síntese do PET através do ácido tereftálico e etileno glicol (Spinacé 2000).....	32
Figura 2.11- Hidrólise do PET em água neutra formando grupos carboxílicos e hidroxílicos terminais (Spinacé 2000). .....	34
Figura 3.1 - Curva típica resultante de um ensaio à tração não confinada em um geotêxtil. ...	38
Figura 3.2 – Evolução esquemática das propriedades funcionais e requeridas de um Geossintético em uma aplicação de reforço, desde a sua instalação (ISO/TR -13434 1998 – adaptado).....	39
Figura 3.3 – Desenho esquemático da obtenção de curvas de redução na resistência a tração devido à Fluência (a) e à hidrólise em meio alcalino (b) para geotêxteis não tecidos. ...	43
Figura 3.4 – Curvas esquemáticas de ensaios de fluência. ....	45
Figura 3.5 – Exemplo esquemático do comportamento em fluência em função da tensão ou temperatura (Van Vlack 1984) .....	46
Figura 3.6 – Representação esquemática da obtenção de curvas isócronas (Baras 2001 – adaptado).....	47

Figura 3.7 – (a) resultado esquemático do ensaio de fluência utilizando a técnica SIM com quatro patamares de temperatura. (b) curva de fluência final, após tratamento gráfico. (Baras 2001).....	48
Figura 3.8 – foto do efeito da degradação mecânica em fibras de poliéster (Greenwood, 2002) .....	50
Figura 3.9 – resultados das análises de deformação em fluência em P1. ....	54
Figura 3.10 – resultados das análises de deformação em fluência em P2. ....	54
Figura 3.11 – Resistência à tração residual para as amostras P3 após imersão. Legenda dos números das soluções, ver Tabela 3.5. ....	55
Figura 3.12 – Resultados dos ensaios de fluência em filamentos de PET de Krumm (1988) e Viezze et al. (1990) segundo Allen & Bathurst (1996) – adaptado .....	57
Figura 3.13 – Resultados dos ensaios de análise da ruptura por fluência em filamentos de PET, com as respectivas regressões e limites de confiança (dados de Krumm 1988 – adaptado de Allen & Bathurst 1996). ....	58
Figura 3.14 – Resultados dos ensaios de fluência em um geotêxtil tecido de Polipropileno (320g/m <sup>2</sup> ) para amostras intactas e após danos (Pinho – Lopes et al. 2002 – adaptado). ....	62
Figura 3.15 - Resultados dos ensaios de fluência em uma geogrelha de PET para amostras intactas e após danos (Pinho – Lopes et al. 2002 – adaptado).....	62
Figura 3.16 – Resultados dos ensaios de ruptura por fluência para amostras intactas e após danos mecânicos em geogrelhas de poliéster (Schröer et al. 2000 – adaptado). ....	65
Figura 3.17 - Resultados dos ensaios de fluência (SIM) para amostras intactas e após danos mecânicos em geotêxteis de polipropileno reforçados com poliéster (Greenwood, 2002 – adaptado).....	65
Figura 3.18 – Amostra de PET 1, após 20 dias de imersão em solução 10,1% de NaOH, à temperatura ambiente e 2kg de carga inicial – East & Rahman (1999.) .....	68
Figura 3.19 - Amostra de PET 1, após 30 dias de imersão em solução 10,1% de NaOH, à temperatura ambiente e 1kg de carga inicial – East & Rahman (1999). ....	68
Figura 3.20 - Expectativa de ruptura para diferentes carregamentos pré-imersão em escala logarítmica (dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)) .....	70
Figura 3.21 - Expectativa de ruptura para diferentes carregamentos pré-imersão em escala linear, sem considerar os valores de Cmax. (dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)).....	70
Figura 3.22 - Expectativa de ruptura para diferentes carregamentos pré-imersão em escala linear (dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)) .....	71

Figura 3.23 – Consideração do efeito sinérgico entre o carregamento e hidrólise em fios de PET, imersos em solução de NaOH, com pH 12 à temperatura ambiente, utilizando dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004).	72
Figura 4.1 – Organograma ilustrativo da seqüência de ensaios adotada, onde CP <sub>v</sub> e CP <sub>a</sub> são os corpos-de-prova antes e após ataques químicos, respectivamente.	75
Figura 4.2 – Desenho esquemático e corte do modelo do sistema de fixação utilizado.	77
Figura 4.3 – Máquina de ensaios utilizada - Instron 1131	79
Figura 4.4 – Sistemas de fixação inferior e superior utilizados nos ensaios de tração.	80
Figura 4.5 – Sistema de aplicação de cargas por meio de deslocamento com rosca.	87
Figura 4.6 – Foto do modelo de cargas utilizado.	88
Figura 4.7 – Desenho esquemático do ensaio de fluência convencional com sistemas de leitura.	91
Figura 4.8 – Esquema adotado para bloqueio de giro nos ensaios de fluência	91
Figura 4.9 – Estágios inicial e final da etapa de preparação e carregamento dos corpos-de-prova no ensaio de fluência convencional.	93
Figura 4.10 – Sistema para avaliação das perdas nos valores das cargas aplicadas.	96
Figura 4.11 – Gráfico para correção dos valores entre as cargas reais e as cargas aplicadas.	96
Figura 4.12 – Placa de fixação dos corpos-de-prova montada, em imersão pré-ensaio.	97
Figura 4.13 – Sistema de leitura dos tempos de ruptura - ensaios de fluência associada (vista lateral)	98
Figura 4.14 – Desenho esquemático do modelo de ensaio utilizado para análise da Fluência Associada (vista corte lateral).	99
Figura 4.15 – Foto do ensaio de fluência associada em andamento e sistema de leitura dos tempos	100
Figura 4.16 - Foto da fixação dos corpos-de-prova à placa de imersão.	101
Figura 5.1 – Curva típica dos ensaios de tração.	103
Figura 5.2 – Resistência à tração dos corpos-de-prova após imersão - Ca(OH) <sub>2</sub> ; pH 12;32 <sup>0</sup> C	106
Figura 5.3 – Resultados das análises de fluência convencional.	107
Figura 5.4 – Resultados dos ensaios de fluência convencional e associada (Ca(OH) <sub>2</sub> – pH 12).	108
Figura 5.5 - Resistência à tração dos corpos-de-prova após imersão em solução de Ca(OH) <sub>2</sub> com pH 12 e temperatura de 32 <sup>0</sup> C	109

Figura 5.6 – Resultados dos ensaios de fluência convencional, fluência associada e resistência após hidrólise, em filamentos de PET. ....	110
Figura 5.7 – Expectativa de comportamento da degradação devido à hidrólise. ....	112

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

Em obras geotécnicas que utilizam geossintéticos, uma das grandes preocupações dos projetistas está no comportamento e manutenção das características em longo prazo destes elementos face sua interação com o meio. Solicitações de natureza mecânica, química ou mesmo biológica devem, e são, consideradas em projetos através de componentes de minoração, chamados de *Fatores de Redução Parciais*. Esses fatores são avaliados de forma independente e variam de acordo com as solicitações e considerações do projetista. O produto de todos, juntamente com um fator de segurança, resulta no *Fator de Redução Total*, aplicado como dividendo da resistência à tração do geossintético. Em outras palavras, os *Fatores de Redução* são a garantia de que, ao final da vida útil da obra, os elementos utilizados ainda resistam às solicitações de projeto impostas.

Apesar de existirem diversos estudos no sentido de conhecer e compreender as causas e efeitos da degradação dos geossintéticos aplicados em obras de reforço, pouco se sabe sobre a sinergia entre essas variáveis, tanto em curto como em longo prazos. Conseguir medir esses efeitos sinérgicos implicará no aumento da confiabilidade dos cálculos e conseqüente segurança, principalmente em obras de grandes responsabilidades.

Seguindo esta ótica se enquadra o primeiro dos objetivos deste trabalho, que é o de alertar sobre a importância e demonstrar por meio de ensaios a existência desta sinergia entre os *fatores de redução parciais*. Complementando os objetivos deste trabalho está a proposição de um novo princípio de ensaio, que consiga avaliar os danos causados pela fluência e pelos ataques químicos, quando agindo de forma simultânea. Alertar para problemas encontrados ao longo das experimentações também pode ser visto como um dos objetivos, uma vez que esse tema é pouco explorado na literatura e de suma importância para o meio acadêmico.

Em função da gama de materiais, situações e variáveis possíveis de serem consideradas, torna-se necessário restringir este trabalho à análise do efeito do ataque químico no processo de fluência dos geossintéticos destinados a reforço. O foco deste estudo é o poli(tereftalato de etileno) – PET devido ao seu amplo uso e sensibilidade aos meios fortemente alcalinos (Koerner 1998). Como reagente, foi escolhido o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) com pH 12, que, de acordo com o estudo de Melo (1990), é a solução com maior influência na hidrólise dos poliésteres e facilmente encontrado em obras, principalmente aquelas que utilizem elementos de concreto. Sabe-se que dificilmente será observado um meio tão fortemente alcalino na natureza, porém, os estudos de Koerner & Koerner<sup>(1)</sup> e Koerner et al. (2001, 2002) chegaram a registrar pH da ordem de 10 em análises de muros reforçados, o que já sugere uma situação crítica. Como não há o desejo de se quantificar os processos e face à complexidade do problema, este trabalho considera apenas as situações tidas como críticas.

Optou-se por corpos-de-prova sob a forma de filamentos, primeiro pela homogeneidade e também pelas baixas cargas necessárias aos ensaios de fluência.

Este estudo se divide em três partes: a primeira, composta por uma revisão bibliográfica acerca dos geossintéticos, polímeros e respectivos processos de degradação por hidrólise e

---

<sup>1</sup> Koerner, G.M. and Koerner, R.M. (em andamento); “Alkalinity Between Masonry Blocks of a Segmental Retaining Wall (SRW)”; GRI-18 – Geosynthetics Research and Development in Progress



fluência – Capítulos 2 e parte do Capítulo 3; a segunda é um estado da arte dos trabalhos já publicados em torno da sinergia entre fatores de redução – Capítulo 3; e uma última etapa que engloba a parte experimental das análises, desde a concepção dos equipamentos até a execução dos ensaios e resultados – Capítulos 4, 5. Ao Capítulo 6, competem as conclusões e comentários finais.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. PRODUTOS PARA APLICAÇÃO EM REFORÇO**

#### **2.1 Introdução**

Este capítulo tem a primeira parte reservada para uma revisão acerca dos principais geossintéticos de interesse na aplicação de reforço de estruturas geotécnicas: os geotêxteis e as geogrelhas. À segunda parte compete um breve estudo sobre polímeros, com ênfase nos poliésteres e sua estrutura, processo de fabricação e comportamento sob solicitações, sejam elas de natureza químicas ou mecânicas.

#### **2.2 Os geossintéticos**

##### **2.2.1 Introdução**

O termo *geossintéticos* (*Geo – Terra; Sintéticos – materiais*, em sua grande maioria, advindos da indústria plástica) expressa uma família de produtos poliméricos, industrializados, especialmente concebidos para a geotecnia e com aplicações diversas. Detalhes, como por exemplo, o processo e forma de fabricação, o polímero utilizado, os aditivos e a configuração estão diretamente relacionados com a função final que um determinado produto irá exercer. Para cada função, há geossintéticos especialmente desenvolvidos, com características e parâmetros de comportamento estudados e quantificados (Koerner 1998).

Uma definição completa e concisa pode ser vista na Norma Brasileira – NBR 12553 (2002) que define o termo *Geossintéticos* como sendo a denominação genérica de produtos poliméricos (sintéticos ou naturais), industrializados, desenvolvidos para utilização em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, dentre as quais se destacam: reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

É constante o crescimento de aplicações e linhas de produtos Geossintéticos. Isso se deve principalmente ao desenvolvimento tecnológico que vem acompanhando essa indústria que tem conseguido, desta forma, reduzir os custos finais ao consumidor e, principalmente, garantir melhor desempenho com durabilidade e segurança nas diversas aplicações.

O enfoque deste estudo está em uma aplicação já bem consolidada, a qual os geossintéticos atuam principalmente como elementos de *reforço* de estruturas geotécnicas. Neste caso, os elementos são submetidos a esforços de tração, que podem se estender por longos períodos de tempo. *Geotêxteis* e *Geogrelhas* são os principais representantes deste segmento.

### **2.2.2 Geotêxteis**

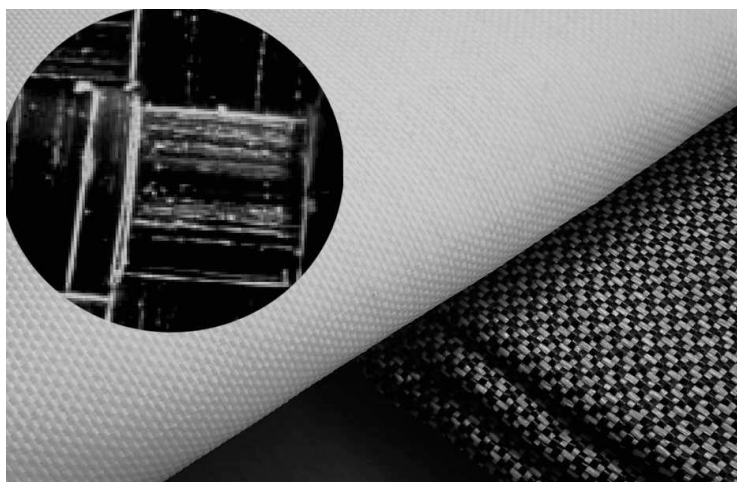
Os Geotêxteis são elementos bidimensionais, permeáveis, fabricados a partir de filamentos ou fibras poliméricas (NBR 12553 2002). Podem se classificados como *tecidos* ou *não-tecidos* dependendo da sua estrutura.

Os *Geotêxteis tecidos* possuem uma estrutura alinhada formada por fios ou laminetes entrelaçados com direções preferenciais, gerando assim uma malha fechada e bem definida, como ilustrado na Figura 2.1. Isso confere ao elemento uma maior rigidez e homogeneidade, porém podendo apresentar uma grande variação nos valores de resistência à tração, quando variado o sentido do ensaio.

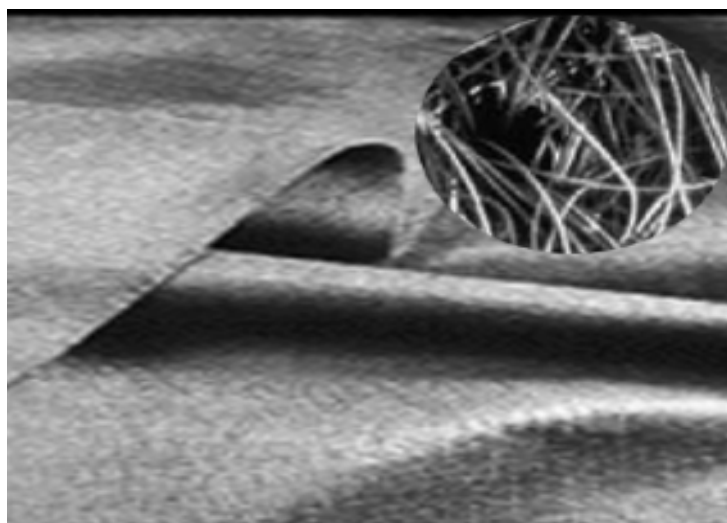
Já os Geotêxteis não-tecidos são formados por filamentos (contínuos) ou fibras (cortadas), dispostos aleatoriamente, interligados por:

- Produtos químicos – *resinados*;
- Fusão parcial – *termoligados*;
- Mecanicamente – *agulhados*.

Seu uso como reforço de estruturas é limitado pela baixa resistência ou rigidez apresentada. A Figura 2.2 apresenta a foto de um Geotêxtil não tecido agulhado.



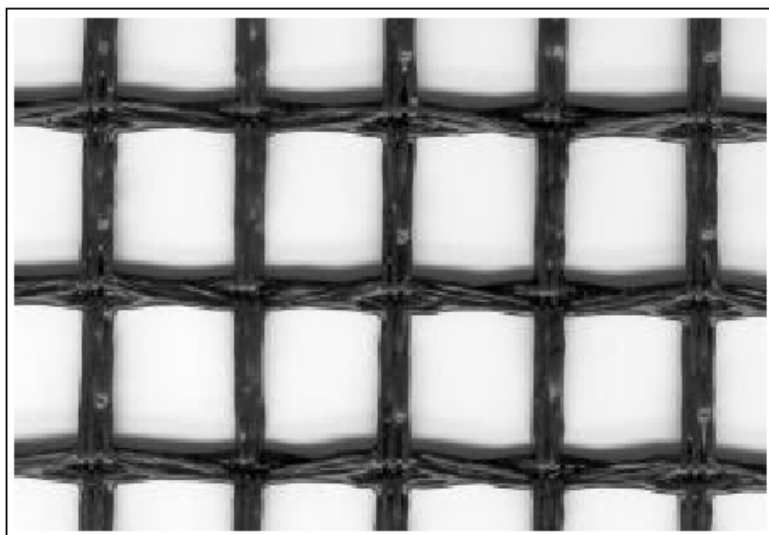
*Figura 2.1 - Exemplo de geotêxtil tecido.*



*Figura 2.2 – Exemplo de geotêxtil não tecido agulhado (zoom de 30x no detalhe).*

### 2.2.3 Geogrelhas

As Geogrelhas por sua vez, são estruturas em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas. São constituídas por elementos resistentes à tração, sendo consideradas unidirecionais quando apresentam elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecionais quando apresentam elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas, o que caracteriza o tipo de união existente entre os elementos ortogonais. Possuem, em geral, alta resistência à tração e elevada rigidez (NBR 12553 2002). A Figura 2.3 ilustra um modelo de Geogrelha bidirecional.



*Figura 2.3 – Exemplo de geogrelha bidirecional.*

## 2.3 Os Polímeros

### 2.3.1 Introdução

Os Geossintéticos são compostos principalmente por polímeros. Portanto, seu comportamento está condicionado ao polímero utilizado na sua fabricação. A escolha do Geossintético ideal para determinado tipo de obra tem como um dos principais parâmetros a resistência e

compatibilidade do polímero constituinte com o meio e as solicitações. Esses fatores podem ser decisivos na vida útil de uma obra.

O termo “polímeros” denota uma molécula feita a partir da repetição de pequenas unidades simples, os monômeros ou meros, como ilustrado esquematicamente na Figura 2.4. Todos os polímeros são macromoléculas apresentadas sob a forma de longos segmentos moleculares, o que propicia um emaranhado (enlaçamento), alterando os espaços vazios entre as cadeias. Sua natureza química tem implicações na sua estrutura formada, tanto no que se refere à constituição quanto à configuração e à conformação. Possuem atrações intermoleculares fracas, devido principalmente ao tamanho e arranjo das moléculas (Van Vlack 1984, Rodriguez 1989, Mano & Mendes 1999).

O número de repetições dos meros na cadeia polimérica indica o *grau de polimerização* e a somatória de suas massas, constitui a *massa molecular*.

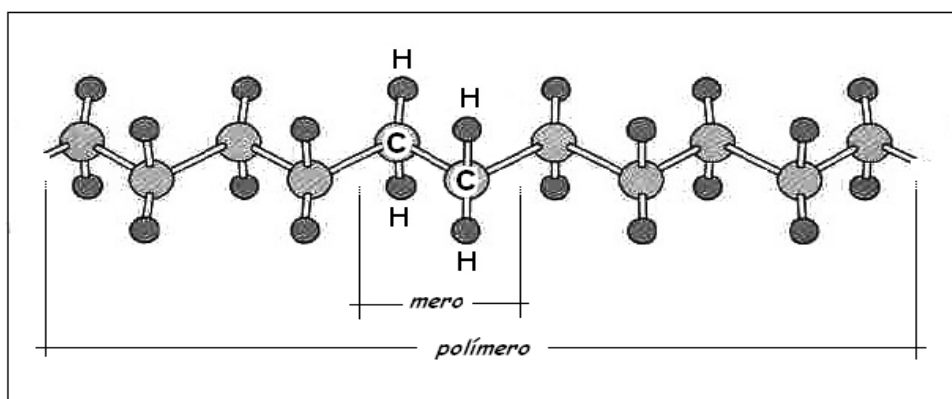


Figura 2.4 - Desenho esquemático de uma molécula de polietileno (Demarquete 2001 - adaptado).

### 2.3.2 Estrutura Polimérica

As propriedades do produto final estão diretamente ligadas à estrutura macromolecular dos polímeros que o compõe. As variações estruturais influenciam decisivamente nas suas propriedades, as quais estão relacionadas à resistência das ligações covalentes, à rigidez dos

segmentos na cadeia polimérica e à resistência das forças intermoleculares do material. Daí explica-se o comportamento extremamente heterogêneo deste material quando submetido a alguma solitação na intenção de separar essas cadeias que, dependendo de como estão arrançadas ou como são solicitadas, respondem de maneira diferente. O grau de compactação da massa responde em grande parte pelas características mecânicas e é função da disposição e ordenamento das moléculas (Lourenço et al. 2003)

As propriedades dos polímeros dependem também da formulação e do processamento do material, uma vez que a morfologia da massa moldada varia, para uma mesma composição e equipamento, conforme o histórico térmico e mecânico a que foi submetida, como por exemplo, o estiramento.

As unidades básicas dos polímeros, os meros, se unem formando longas cadeias com configurações distintas. Quando essas cadeias não apresentam ramificações, diz-se que são *lineares*, próprias dos *polímeros lineares*. Analogamente, definem-se como *polímeros ramificados* aqueles que apresentam ramificações em suas cadeias. Há ainda cadeias mais complexas, com ligações cruzadas, formando *polímeros reticulados*. A Figura 2.5 ilustra esquematicamente esses três tipos de estruturas moleculares. Alguns autores relatam a existência de um quarto grupo, onde as cadeias se encontram totalmente interligadas, formando uma espécie de rede (Demarquete 2001).

As *estruturas cristalinas ou cristalitos* compõem a região ordenada dos polímeros. São segmentos cuja conformação é favorável à obtenção de estruturas repetidas, regularmente dispostas, isto é, regiões ou volumes de matéria em que as unidades estruturais, sejam átomos íons, meros ou moléculas, estão arrançadas em um sistema geométrico regular. Essas estruturas se encontram dispersas em meio à matriz *amorfa*, que consiste de moléculas rejeitadas durante o processo de cristalização. Esses segmentos moleculares formam uma

estrutura desordenada, com um embaraçamento aleatório das cadeias. Isso caracteriza as *estruturas amorfas*. A Figura 2.6 ilustra esquematicamente esses dois tipos de estruturas.

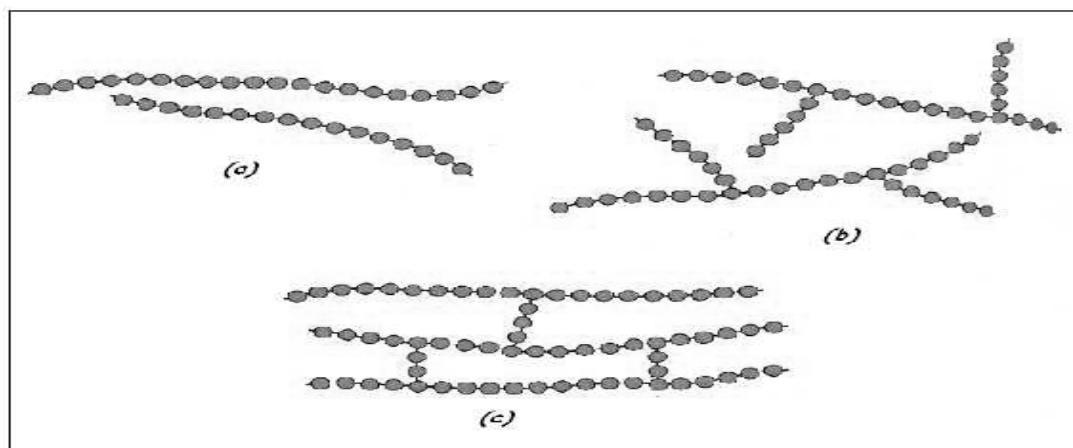


Figura 2.5 – Representação de cadeias macromoleculares: (a) polímeros lineares, (b) polímeros ramificados e (c) polímeros reticulados (Demarquete 2001)

Um polímero de alta cristalinidade pode ser considerado um sistema heterogêneo constituído de componentes de resistência ou reforço (os cristalitos), dispersos em uma matriz amorfa (fase amorfa).

Mano & Mendes (1999) definem o conceito de *cristalinidade* como sendo um arranjo ordenado de matéria no espaço, com repetição regular de grupos atômicos ou moleculares. No caso dos polímeros tal arranjo depende da estrutura química, da massa molecular e do tratamento físico, incluindo temperatura, tempo e forças a que foi submetido o material.

O arranjo das macromoléculas pode ser explicado segundo dois modelos principais: o modelo da “micela franjada” e o modelo da “cadeia dobrada”, sendo o segundo mais recente e de aceitação generalizada.

No modelo da micela franjada, admite-se que pequenos cristais existam como parte inseparável da matriz amorfa. Assim, o polímero jamais poderia atingir 100% de cristalinidade. Admite-se que cada cristal seja formado por um feixe de cadeias paralelas,



sendo tão pequenos que cada cadeia macromolecular passe através de vários feixes, denominados cristalitos. A Figura 2.7 ilustra a estrutura macromolecular de um polímero segundo esse modelo. Por esse conceito, supunha-se não ser possível a formação de cristalitos independentes, mesmo partindo-se de soluções diluídas do polímero, devido ao embaraçamento das macromoléculas.

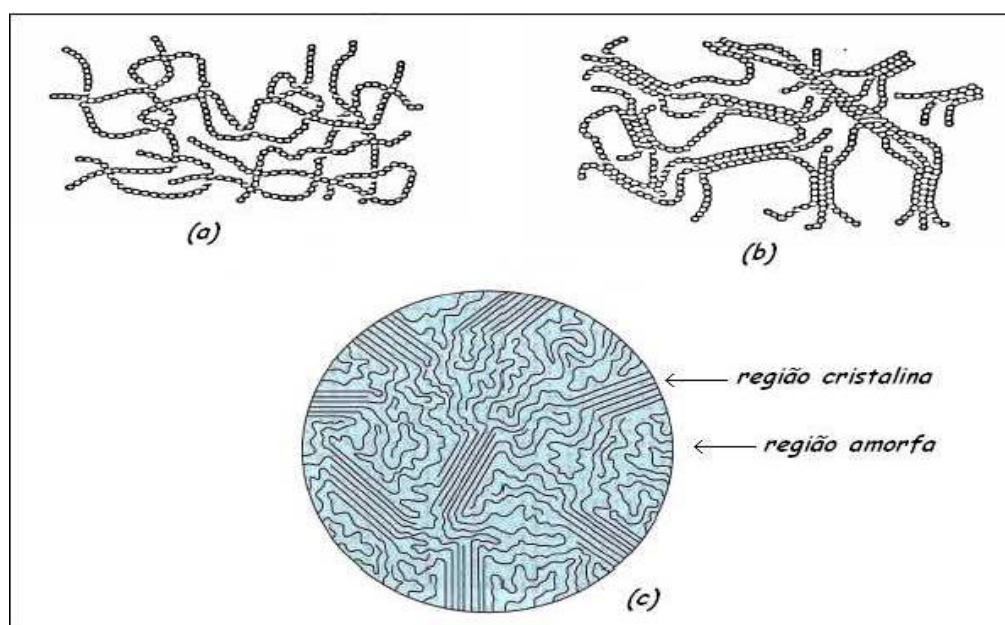
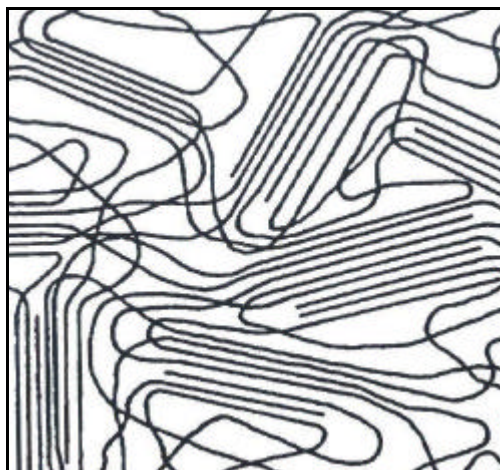


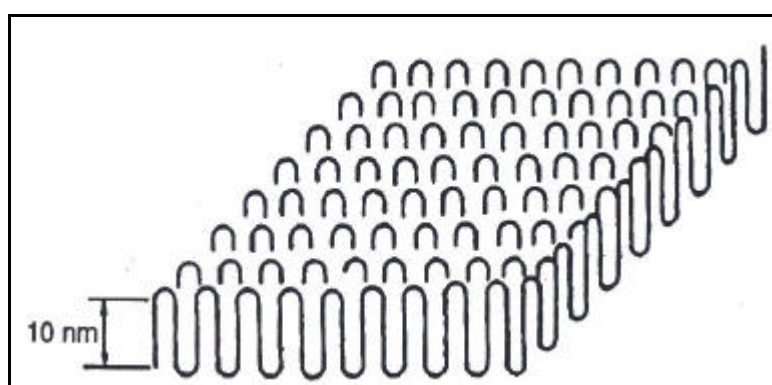
Figura 2.6 – Estrutura macromolecular dos polímeros. (a) estrutura amorfa; (b) Estrutura parcialmente amorfa (parcialmente cristalino); (c) microestrutura de um polímero semi-cristalino apresentando regiões cristalinas e amorfas (Demarquete 2001).

Porém, na década de 50, pesquisadores conseguiram obter cristais de soluções muito diluídas. Formas geométricas bem definidas de monocristais de polietileno emergindo da matriz amorfa, como romboedros superpostos, foram observados no microscópio ótico. Estudos de difração de elétrons nesses cristais revelaram que as cadeias poliméricas estavam orientadas perpendicularmente ao plano das micro-lâminas cristalinas. Como as moléculas nos polímeros são pelo menos 10 vezes maiores do que as micro-lâminas, a única explicação plausível para o fato é que as cadeias estejam dobradas, como uma fita, exemplificado na

Figura 2.8, o que dá respaldo ao modelo das “cadeias dobradas” (Crawford 1998, Mano & Mendes 1999).



*Figura 2.7 – Estrutura macromolecular segundo modelo da micela franjada – (Crawford 1998).*



*Figura 2.8 – Estrutura macromolecular segundo modelo da cadeia dobrada – (Crawford 1998).*

### **2.3.3 Comportamento mecânico**

O comportamento mecânico dos polímeros depende, além da sua composição química e estrutura molecular, da temperatura, da escala de tempo e frequência do esforço a que for submetido.

A temperatura influencia diretamente na mobilidade das moléculas. Quanto maior a temperatura, maior a mobilidade, o que torna o material mais viscoso.

Tomando como exemplo uma massa polimérica resfriada, ao elevar progressivamente a temperatura, há um momento em que ocorre uma transição de pseudo-segunda ordem, chamada *temperatura de transição vítrea* ( $T_g$ ), a partir da qual as regiões amorfas aumentam progressivamente a sua mobilidade. Prosseguindo com o aquecimento, nos polímeros semicristalinos, há uma transição de primeira ordem denominada *temperatura de fusão cristalina* ( $T_m$ ). Acima dessa temperatura, o polímero estará no estado líquido viscoso. Vale ressaltar que a transição vítrea na verdade não é uma transição de fase. Mesmo assim o termo transição é utilizado. A transição vítrea é acompanhada de uma mudança no volume, densidade, propriedades elétricas e mecânicas. A diferença entre as propriedades de um polímero à temperaturas abaixo e acima da temperatura da transição vítrea é observada na mobilidade de suas moléculas, e portanto na diferença do tempo de relaxação. A determinação da temperatura de transição vítrea pode ser feita através do estudo da variação destas propriedades com a temperatura (Callister 1997 e Felisberti 1995).

Segundo Felisberti (1995) uma característica importante dos polímeros é que seu comportamento mecânico depende da escala de tempo do experimento usado para caracterizá-lo. Ou seja, o módulo de deformabilidade depende da escala de tempo do experimento. Isso se deve aos diferentes processos de relaxação das cadeias poliméricas que possuem tempos característicos de relaxação. O aumento da temperatura causa um aumento na mobilidade das cadeias e conseqüentemente causa a diminuição dos tempos de relaxação. Com isso, à medida que a temperatura é aumentada, novos processos de relaxação podem ser observados, mudando assim o comportamento do material frente a um esforço mecânico. Se a temperatura é mantida constante, os tempos de relaxação permanecem constantes. Desta forma, os processos de relaxação somente serão observados à medida que a escala de tempo do experimento for da mesma ordem de grandeza que o tempo de relaxação.

Na Figura 2.9, é possível observar esquematicamente o efeito do aumento da temperatura em um polímero. Na região vítrea ( $T < T_g$ ) o material é rígido e quebradiço, o módulo elástico independe da temperatura e o comportamento elástico prevalece, desde que a deformação seja pequena. Na região viscoelástica, onde ocorre a transição vítrea, o módulo e a deformação são bastante dependentes da temperatura e tempo. Na região borrachosa, o material deforma como as borrachas, pois o módulo de relaxação é relativamente baixo e praticamente constante. Na região fluxo viscoso, o módulo cai dramaticamente e o material flui sob ação da carga, ou seja ocorre deformação permanente, sendo esta a região onde o polímero pode ser processado sob pressão. No caso de polímeros semicristalinos esta região ocorre acima da temperatura de fusão. (Callister 1997).

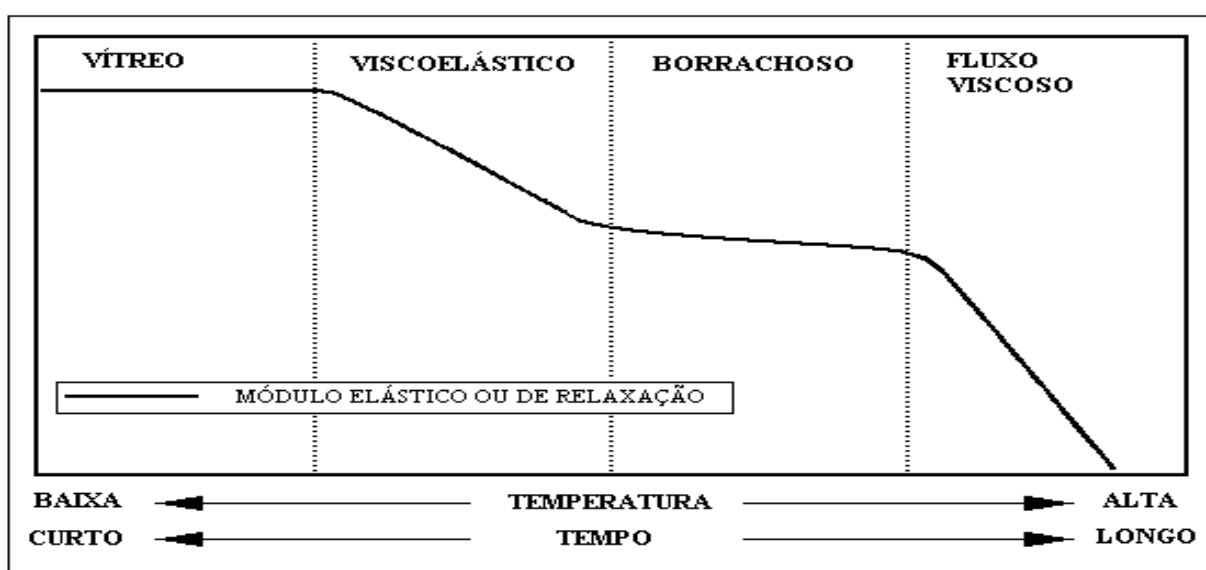


Figura 2.9 – Representação esquemática do comportamento de uma massa polimérica resfriada submetida a um aumento gradual de temperatura (Lourenço et al 2003).

Os polímeros geralmente possuem temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão próprias. Esses valores podem servir, inclusive, para ajudar na caracterização do polímero, tanto para a validação de uma amostra, como para descarte daquelas com indícios

de alterações na composição. A Tabela 2.1, contém alguns exemplos de polímeros e o valor das respectivas temperaturas de transição vítrea e de fusão.

O estudo realizado por Spinacé (2000) em amostras de PET demonstra que, neste caso, os valores da  $T_g$  e da  $T_m$  não sofrem significativas alterações com ciclos subsequentes de reciclagem.

*Tabela 2.1 – Exemplos de Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e temperatura de fusão ( $T_m$ ) de alguns dos polímeros mais comuns (Mano & Mendes 1999).*

Polímero	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
PEAD – polietileno de alta densidade	-120	135
PEBD – polietileno de baixa densidade	-20	120
PP – polipropileno	4 – 12	165 - 175
PET – poli(tereftalato de etileno)	70 - 74	250 - 270
PVC – poli(cloreto de vinila)	81	273*

(\*) temperatura de decomposição

Quanto às propriedades físicas, os polímeros são classificados em termoplásticos e termoestáveis. Em termos gerais é possível diferenciá-los pelo amolecimento quando submetidos ao calor. Os termoplásticos podem ser conformados mecanicamente repetidas vezes, desde que reaquecidos. Possuem estrutura parcialmente cristalina ou totalmente amorfa, com cadeias lineares ou ramificadas. Já os termoestáveis são normalmente duros e só podem ser conformados plasticamente apenas em um estágio intermediário de sua fabricação. Não amolecem quando expostos ao calor e são completamente amorfos apresentando uma estrutura tridimensional em rede com ligações cruzadas (Demarquete 2001).

### **2.3.4 Processo de fabricação**

Tudo que afete a mobilidade molecular, como por exemplo, composição química, oxidação, adição de cargas ou material de menor massa molecular, indução de cristalização por

estiramento, entre outros, tem efeito sobre a região de transição vítrea do polímero, e conseqüentemente sobre o seu comportamento térmico e mecânico (Lourenço et al 2003).

A matéria prima utilizada, a porcentagem de material reciclado e o processo de fabricação alteram o tamanho e a disposição dessas cadeias poliméricas de maneira a tornar suas ligações mais ou menos fortes.

A reação de síntese que transforma um ou mais tipos de monômeros em polímeros é chamada de polimerização e pode se dar através de processos térmicos, radioativos e químicos.

Os mecanismos de polimerização são dois e classificados em: *por adição* e *por condensação*.

A polimerização por adição é uma reação em cadeia e envolve 3 etapas que podem ocorrer sucessiva ou simultaneamente: *iniciação*, *propagação* e *terminação*. A velocidade de reação é rápida, não há subprodutos e ocorre a formação imediata dos polímeros. Normalmente, os polímeros de adição têm a cadeia regularmente constituída por apenas átomos de carbono, ligados covalentemente.

Durante a polimerização por condensação, a reação ocorre em etapas, com velocidade de reação lenta e sem formação imediata dos polímeros. Há geração de subprodutos, que normalmente são moléculas de  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $NH_3$ , etc, e que necessitam serem retiradas para que haja o crescimento das cadeias. À medida que os segmentos moleculares vão sendo incorporados, o meio reacional se torna cada vez mais viscoso, o que dificulta ou mesmo impede a remoção desses subprodutos e prejudica o deslocamento do equilíbrio reacional. Os polímeros por condensação apresentam em sua cadeia principal não somente átomos de carbono, mas também átomos de outros elementos como oxigênio, nitrogênio, enxofre, etc (Mano & Mendes 1999, Melo 1990).

O processo de transformação em artefatos de borracha, plástico ou fibras é dividido em 2 grandes grupos, diferenciados pela forma de obtenção de fluidez da massa, que pode ser por adição de um líquido ou por aquecimento. A moldagem é feita através de um dos seguintes processos: vazamento, fiação por fusão, compressão, injeção, calandragem, extrusão, sopro, termoformação, fiação seca, fiação úmida e imersão. A Tabela 2.2 esquematiza os tipos de moldagem seguidos de algumas características do processo.

*Tabela 2.2 – Processos de fabricação de artefatos poliméricos (Mano & Mendes 1999).*

<b>Tipo de moldagem</b>	<b>Calor</b>	<b>Pressão</b>	<b>Dispersante</b>	<b>Produto</b>
Vazamento	Sim	Não	Não	Acabado ou semi-acabado
Fiação por fusão	Sim	Não	Não	Semi-acabado
Compressão	Sim	Sim	Não	Acabado
Injeção	Sim	Sim	Não	Acabado
Calandragem	Sim	Sim	Não	Semi-acabado
Extrusão	Sim	Sim	Não	Semi-acabado
Sopro	Sim	Sim	Não	Acabado
Termoformação	Sim	Sim	Não	Acabado
Fiação úmida	Não	Não	Sim	Semi-acabado
Imersão	Não	Não	Sim	acabado

#### **2.4 Poliester – poli(tereftalato de etileno)**

Um éster, como mostrado na Figura 2.10, é definido quimicamente como resultado de uma reação entre álcool e ácido monovalente com eliminação de água. Os poliésteres, por sua vez, são produzidos por esse mesmo tipo de reação, porém utilizando álcoois e ácidos polifuncionais em sua preparação (Araújo 1982).

Os grupos ésteres são a parte mais reativa das cadeias dos poliésteres devido à sua polaridade e onde ocorre maior interação com outros grupos polares facilitando reações de

hidrólise, acidólise, transesterificação, etc (Spinacé 2000). Esses grupos continuam apresentando as propriedades dos ácidos, mas devido às longas cadeias, têm a características de ácido fraco. A presença de grupos carboxílicos favorece o processo de hidrólise (reações com OH<sup>-</sup>) sendo que com maior intensidade em ambientes alcalinos.

O poli(tereftalato de etileno), comercialmente conhecido como PET, é um poliéster produzido a partir da policondensação em massa de ácido tereftálico ou tereftalato de dimetila, mais etilenoglicol, como ilustrado na Figura 2.10. Essa reação gera, dentre outros subprodutos, moléculas de H<sub>2</sub>O.

O PET é um poliéster termoplástico considerado leve, com elevada resistência mecânica, química e térmica e baixa permeabilidade a gases. Apresenta massa molecular da ordem de  $4,0 \times 10^4$  g/mol, densidade variando de 1,33 a 1,45 e tem como característica, elevada T<sub>g</sub>, como visto na Tabela 2.1.

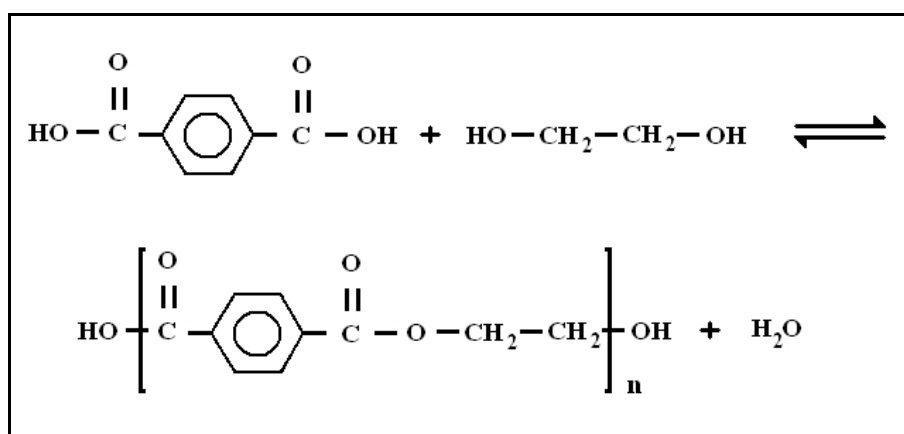


Figura 2.10 - Síntese do PET através do ácido tereftálico e etileno glicol (Spinacé 2000).

O processo de degradação do PET, bem como de diversos tipos de polímeros, pode ser iniciado por cisalhamento (degradação mecânica), calor (degradação térmica), oxigênio e umidade (degradação química), microorganismos (degradação microbiológica), etc ou por uma combinação desses fatores.



A degradação mecânica pode ocorrer durante o processamento, onde o polímero é submetido a cisalhamento ou nos demais casos em que haja tensões aplicadas a esse polímero, seja por atrito, seja por estiramento. Em geral, esse mecanismo de ruptura molecular acontece devido à concentração de tensões no meio das cadeias.

Quando um polímero é submetido a temperaturas elevadas, está susceptível à degradação térmica que pode ocasionar despolimerização e cisão das cadeias poliméricas, com liberação de monômeros e oligômeros, aumento da concentração de grupos ácidos e, conseqüentemente, diminuição da massa molar e a formação de ésteres cíclicos. O grau de degradação é dependente da temperatura, tempo de exposição presença de aditivos e massa molar.

A degradação microbiológica é menos comum e representa pouca ou nenhuma influência na maioria das aplicações de geossintéticos. Trata-se de quebra de cadeias por substâncias produzidas pelo metabolismo de microorganismos e normalmente envolve processo de hidrólise ou oxidação enzimática (Kay et al 2004).

Hidrólise, alcoólise, degradação oxidativa e acidólise são exemplos de degradação química. Nesses casos, as reações que se processam resultam da associação de elementos e moléculas gerando novos produtos ou resíduos.

No caso da hidrólise, é possível afirmar que o processo é basicamente a reação inversa da síntese no PET: uma cadeia linear longa rompida novamente por uma molécula de água, resultando na cisão de uma ligação do éster (Melo 1990). A hidrólise do PET é ainda considerada um processo de cisão simples que ocorre de forma aleatória formando moléculas de baixa massa molar com grupos carboxílicos e hidroxílicos nas extremidades, como ilustrado na Figura 2.11. O aumento da proporção desses grupos terminais no polímero gera indícios da susceptibilidade à hidrólise. Porém estudos (Launay et al 1994, Kay et al 2004) apontam para uma dependência também da cristalinidade e hidroflicidade neste processo já

que a região cristalina reduz a permeação de umidade e a difusão de oxigênio, atuando como uma barreira.

Na água neutra a reação de hidrólise é catalisada pelo COOH (grupo terminal da macromolécula). Neste caso a taxa de hidrólise é proporcional à raiz quadrada da concentração do grupo carboxila. É possível afirmar que essa reação é mesmo autocatalisada, desde que o produto da hidrólise carregue um novo grupo carboxila. Em um ambiente ácido o mesmo mecanismo ocorre só que, neste caso, os íons  $H^+$  livres catalisam a hidrólise, contudo estes íons dificilmente penetram nos filamentos, ficando restritos à superfície de contato. Em ambos os casos o processo é lento.

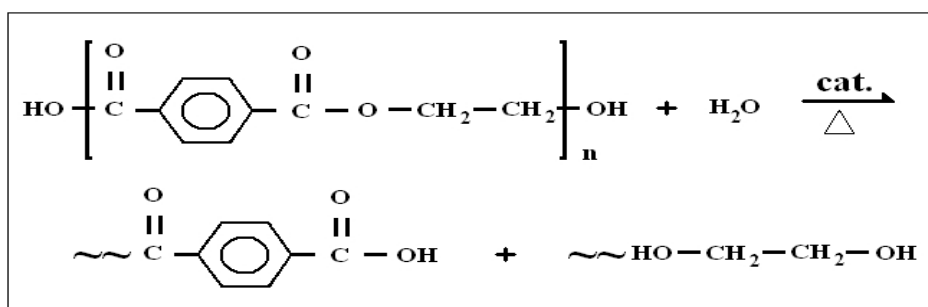


Figura 2.11 - Hidrólise do PET em água neutra formando grupos carboxílicos e hidroxílicos terminais (Spinacé 2000).

Em ambiente alcalino o mecanismo de reação é diferente. A quebra da cadeia no interior do éster, que ocorre por reação com  $\text{OH}^-$ , produz um novo grupo terminal carboxila e um íon  $^- \text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$  que reage imediatamente com o grupo carboxila, gerando um íon  $\text{COO}^-$ . Como a reatividade do grupo  $\text{OH}^-$  é bem superior que a da molécula de água, é possível considerar a hidrólise apenas em meios alcalinos ou nos casos onde a temperatura esteja acima da  $T_g$ . Estudos como o conduzido por Buxbaum (1968) mostram que entre  $100^\circ\text{C}$  e  $120^\circ\text{C}$ , em ambiente saturado, a degradação por hidrólise é 10mil vezes mais rápida que a degradação térmica.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO**

#### **3.1 Introdução**

Uma importante característica dos geossintéticos submetidos a esforços de tração é a sua dinamicidade no que diz respeito principalmente às propriedades em longo prazo. Isso é consequência, dentre outros aspectos, do efeito dos carregamentos, da sua constituição polimérica e interação com o meio. Ou seja, ao longo da vida útil da obra é de se esperar que ocorram variações estruturais e comportamentais nesses elementos que podem, em alguns casos, serem significantes. Conhecer todas as variáveis envolvidas e suas tendências de comportamento é, portanto, essencial para garantir a integridade da estrutura após longos períodos de tempo.

Este capítulo é dedicado à apresentação e compreensão dos fatores e parâmetros envolvidos em projetos onde os geossintéticos atuam como elementos de reforço, desde a obtenção em laboratório até as considerações de interação com o meio e degradação.

## 3.2 Geossintéticos como elemento de reforço

### 3.2.1 Introdução

A determinação das características e parâmetros dos geossintéticos pode ser feita de duas formas: através dos ensaios de caracterização ou por meio dos ensaios de comportamento (Vidal et al. 1999).

Os ensaios de caracterização são, em sua grande maioria, padronizados e têm por objetivo apenas a determinação de características intrínsecas dos geossintéticos, servindo assim como referência para projetos e base de comparação entre os diferentes fabricantes. Eles determinam as *Propriedades Índices ou Características* de cada produto.

Já os ensaios que utilizem parâmetros específicos em sua confecção, permitindo considerar as solicitações impostas pela obra, condições de instalação, modo, tempo e intensidade das solicitações, condições ambientais e interação com meios adjacentes são chamados de Ensaio de Comportamento e determinam as *Propriedades Funcionais* do geossintético ensaiado. Em outras palavras, as propriedades funcionais indicam o parâmetro de comportamento do geossintético sob condições de utilização.

No caso de projetos, os valores calculados ou considerados para efeito de dimensionamento são ditos *Propriedades Requeridas*.

O ideal é que os parâmetros de projeto sejam baseados nos resultados obtidos em ensaios de comportamento direcionados especificamente para as solicitações esperadas em campo. Ou seja, os parâmetros deveriam ser resultados de uma representação fiel das adversidades encontradas em cada obra. Entretanto, nem sempre é viável a reprodução de todas essas variáveis e amplitudes devido, principalmente, aos elevados custos, dificuldades de execução e tempo requerido.

### 3.2.2 Propriedades Características

As *propriedades características* (ou propriedades índice) de um geossintético são aqueles parâmetros que identificam as características intrínsecas de cada elemento. São valores normalmente apresentados em catálogos e especificações técnicas e servem como base comparativa entre variados tipos, linhas, modelos e fabricantes. Devem ser resultados de *ensaios índice* que, em sua grande maioria, são normalizados e, portanto, de grande utilidade no controle de qualidade de recebimento em obra desses materiais. Massa por unidade de área, espessura nominal, resistência à tração, resistência à penetração por punção estático e resistência à perfuração são alguns exemplos de ensaios que fornecem parâmetros característicos dos Geossintéticos.

Em projetos de estruturas de solo reforçado, a *resistência à tração* é o principal parâmetro utilizado na escolha do elemento de reforço. Assim sendo, o valor da resistência a tração característica é um importante indicativo do tipo de geossintético que pode ser utilizado e por isso merece especial atenção. No Brasil, a norma sugerida para a avaliação deste parâmetro é a NBR 12824 (1993) – *Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada – Ensaio de tração faixa larga*. Esta norma prescreve o método para a determinação da resistência à tração de geotêxteis, geogrelhas e geocompostos em corpos-de-prova de 200 mm de espessura por 100 mm de comprimento entre garras – *faixa larga*.

Durante a execução do ensaio, os corpos-de-prova são submetidos a uma solicitação em tração não confinada, à taxa de deformação constante e igual a 20 mm/min (rápida) e sob temperatura padrão. Os resultados normalmente são apresentados sob a forma de curvas do tipo *tensão x deformação*, como ilustrado na Figura 3.1, onde é possível obter parâmetros como resistência à tração máxima ( $a_{\max}$ ), alongamento à carga máxima ( $\epsilon_{\max}$ ) e rigidez (J).

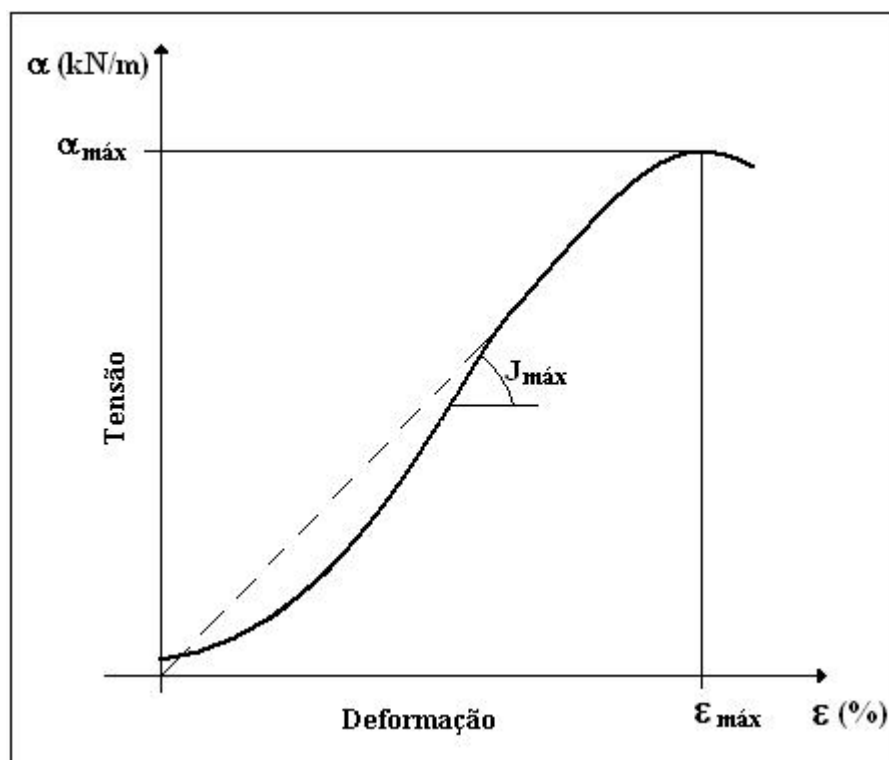


Figura 3.1 - Curva típica resultante de um ensaio à tração não confinada em um geotêxtil.

A NBR 12824 (1993) estabelece ainda que os ensaios em corpos-de-prova úmidos devam ser realizados somente após imersão em água destilada à temperatura de  $(20 \pm 2)^{\circ} \text{C}$ , por um período mínimo de 24 horas. O intervalo de tempo máximo permitido entre a retirada da imersão e o ensaio é de 3 min.

### 3.2.3 Fatores de Redução

A recomendação feita para projetos é correlacionar as Propriedades Índices com as Propriedades Funcionais dos Geossintéticos através dos **Fatores de Redução (FR)**.

Os Fatores de Redução visam assim, prever e considerar já em projeto as prováveis perdas de funcionalidade que o elemento sofre ao longo de toda sua vida útil, seja devido aos danos no processo de instalação, seja devido à fluência, colmatção, ataques químicos, físicos e biológicos, presença de emendas, etc. A Figura 3.2 ilustra esquematicamente a evolução das

propriedades dos geossintéticos envolvidas em uma aplicação de reforço, ao longo da vida útil da obra, considerando as perdas por utilização.

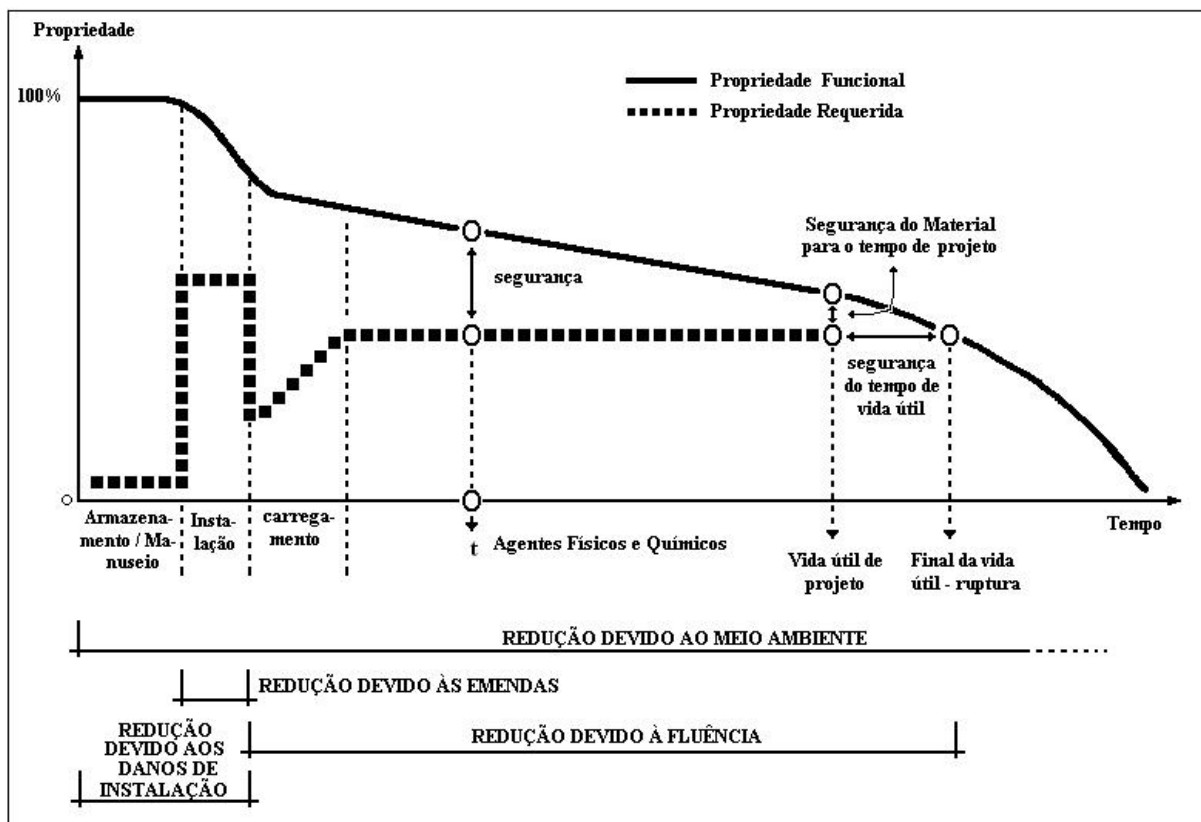


Figura 3.2 – Evolução esquemática das propriedades funcionais e requeridas de um Geossintético em uma aplicação de reforço, desde a sua instalação (ISO/TR -13434 1998 – adaptado).

Para análises de resistência a tração, Berg et al (1998) indicam o uso dos Fatores de Redução da seguinte forma geral:

$$RALP = \frac{\alpha_{\max}}{FR_g \times FS} \quad (3.1)$$

onde RALP é a resistência admissível em longo prazo;

$\alpha_{\max}$  a resistência à tração em ensaio rápido;

$FR_g$  fator de redução global, que é dado pelo produto dos *fatores de redução parciais* ( $FR_p$ ) e,

FS um fator de segurança devido incertezas (i.e. heterogeneidade do material, extrapolação, carregamentos). Porém, é válido ressaltar que esse FS é diferente do  $FS_{global}$  para resistência à tração, que é dado por:

$$FS_{global} = \frac{LTADS}{T_{req}} \quad (3.2)$$

onde  $T_{req}$  é a resistência requerida em projeto.

Ao trabalhar com FRp, pode-se contemplar isoladamente as alterações nas propriedades através do tempo, de acordo com as características de cada obra. Esses fatores são normalmente obtidos experimentalmente e apresentados sob a forma de intervalos de valores que possibilitam uma análise subjetiva de cada variável, em função do tipo e intensidade de solicitação. Existem na literatura diferentes propostas de ensaio para se chegar a tais valores, porém ainda há polêmica sobre alguns deles devido principalmente, à variabilidade de parâmetros envolvidos (Vidal et al. 1999).

A exemplo, os principais FRp utilizados em obras de reforço são:

- $FR_{FL}$  – Fator de Redução devido à Fluência:

*Pode-se afirmar que o efeito da Fluência sobre os materiais poliméricos se verifica principalmente na resistência a tração, que é comprometida proporcionalmente à carga e tempo aplicados. Sob condições de solicitação em tração à deformação constante, o que se observa é uma progressiva perda da resistência. Visto tamanha importância, este assunto será discutido com maior profundidade no item 3.3.2.*

- $FR_{DI}$  – Fator de Redução devido a Danos de Instalação:

*Durante o processo de instalação, os Geossintéticos estão sujeitos à danos mecânicos, provocados principalmente por queda de materiais pontiagudos, passagem de máquinas e operários e pela própria seqüência construtiva (i.e. compactação, lançamento de material granular). Em obras de reforço com Geossintéticos, a maior influência dos danos se observa no comportamento em tração do material. Furos e cortes, além de comprometerem a*



*resistência, tendem a “abrir” sob solicitação. Esse fator é de determinação polêmica, devido à grande variabilidade de parâmetros envolvidos. No item 3.3.3 serão expostos mais detalhes e características deste processo degradativo.*

·  $FR_{MA}$  – Fator de Redução devido à degradação pelo Meio Ambiente:

*Os Geossintéticos estão sujeitos à degradação provocada principalmente por exposição a agentes químicos e biológicos nocivos à sua estrutura. Fatores próprios do meio como pH, temperatura, presença de íons metálicos e de matéria orgânica, devem ser conhecidos ou estimados antes da escolha do polímero e aditivos a serem utilizados. Outro fator é a ação de raios ultravioletas resultante, principalmente exposição à luz solar. Novamente, devido sua importância no contexto deste trabalho, o item 3.3.4 se reserva a discussão desta problemática..*

·  $FR_{EM}$  – Fator de Redução devido à presença de Emendas:

*As emendas podem representar pontos de menor resistência, dependendo do material e técnica empregada. Costuras em geotêxteis, por exemplo, geralmente apresentam resistência à tração inferior à do corpo contínuo. Soldas em geomembranas, por outro lado, tendem a ser mais resistentes. A determinação dos Fatores de Redução deve ser feita através de ensaios em laboratório seguindo padrões de normas, específicas para este tipo de ensaio, como é o caso da NBR 13134 (1994).*

Existem recomendações de valores mínimos e intervalos propostos na literatura para cada Fator de Redução Parcial, como exemplificado na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2. Cabe ao projetista avaliar qual o índice mais adequado à situação encontrada no campo levando em consideração as solicitações e interações com o meio.

Tabela 3.1 - Recomendações de valores para Fatores de Redução Parciais mínimos (Vidal 2002).

	França		Alemanha	
	PET	PP, PE	PET	PP, PE
FR <sub>FL</sub>	2,5	5,0	2,5	5,0
FR <sub>DI</sub>	1,5		1,5 (finos arredondados) 2,0 (grossos arredondados)	
FR <sub>MA</sub> <sup>*</sup>	1,05		1,0	
FR <sub>EM</sub>	1,0 (sem emendas)		1,0 (sem emendas)	

(\*) sem impacto ambiental previsto  
 PET – Poliéster  
 PP – Polipropileno  
 PE – Polietileno

Tabela 3.2 – Fatores de redução recomendados por Koerner (1998) - (Adaptado).

Aplicação	FR <sub>EM</sub>	FR <sub>FL</sub> <sup>(1)</sup>	FR <sub>MA</sub>
Aterro sobre solos moles <sup>(*)</sup>	1,1 – 2,0	2,0 – 3,5	1,0 – 2,0
Pavimento	1,0 – 1,5	1,0 – 2,0	1,0 – 1,7
Reforço de base <sup>(*)</sup>	1,0 – 2,0	1,5 – 2,5	1,0 – 1,8
Vias férreas <sup>(*)</sup>	1,5 – 3,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,4

(\*) fluência em tração

(1) níveis inferiores para obras de curta duração ou nos quais deformações por fluência não sejam críticas ou não comprometam sua funcionalidade

O ideal é trabalhar com valores de FR<sub>p</sub> específicos para o projeto em questão, resultados de ensaios que considerem as diversas solicitações de campo envolvidas e o produto especificado para uso.

A Figura 3.7 (a) ilustra esquematicamente uma curva confeccionada para análise de ruptura em fluência de um geotêxtil submetido a diferentes níveis de carregamento e, em (b) o processo de obtenção da curva de reduções devido a ataque químico específico.

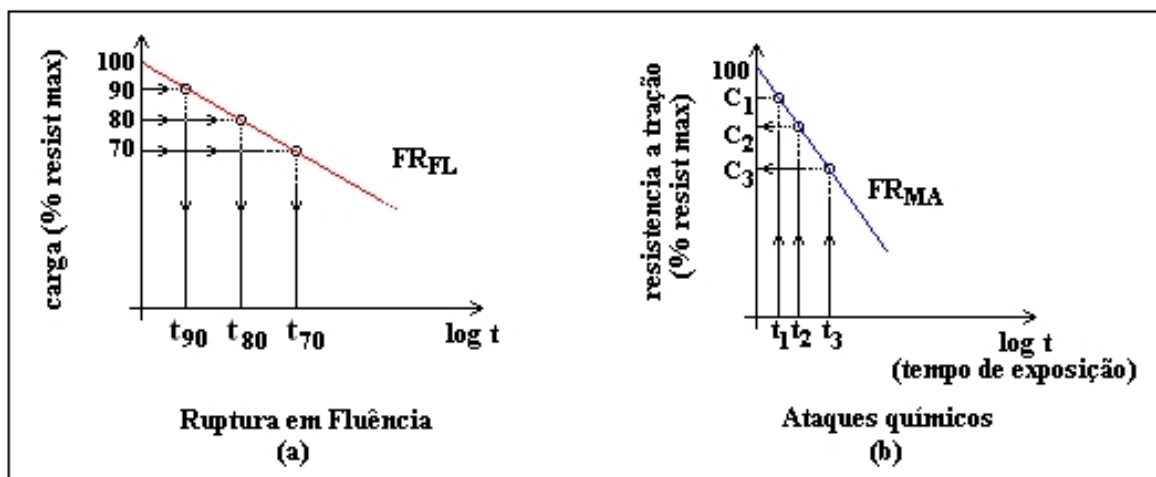


Figura 3.3 – Desenho esquemático da obtenção de curvas de redução na resistência à tração devido à Fluência (a) e à hidrólise em meio alcalino (b) para geotêxteis não tecidos.

### 3.3 Os processos de degradação

#### 3.3.1 Introdução

Os materiais geossintéticos estão sujeitos a variados processos de degradação ao longo da sua vida útil que, como abordado no item 3.2.3, são considerados em projetos através dos fatores de redução. Este tópico é o resultado de um estudo sobre as formas e níveis de atuação, características e as definições dos principais processos de degradação que ocorrem em geossintéticos de PET utilizados em estruturas de reforço.

#### 3.3.2 Fluência

Fluência é o fenômeno físico caracterizado pela lenta deformação que ocorre em muitos materiais, devido principalmente à ação de carregamentos de natureza constante e estática e inferiores ao limite de escoamento do material. Alguns autores ainda destacam a dependência da Temperatura neste processo (Abramento 1995, Finnie & Heller 1959, Hult 1966, Koerner 1998, Van Vlack 1984).

No caso dos Geossintéticos, o processo de fluência depende principalmente das características intrínsecas do polímero, das condições de temperatura, do tempo, da

intensidade de cargas aplicadas, da ordenação das fibras (i.e. tecidos, não tecidos, grelhas, etc.) e da presença ou não de confinamento. Como o interesse deste estudo reside apenas no comportamento das fibras poliméricas, os dois últimos fatores podem ser desconsiderados.

As características intrínsecas dos polímeros são aquelas diretamente ligadas à sua estrutura molecular. A composição, processo de fabricação, história térmica, grau de cristalinidade e massa molar são alguns dos itens relevantes, uma vez que influenciam diretamente na ordenação e estruturação das cadeias e conseqüente comportamento em fluência.

O processo de fluência nos polímeros é resultante do deslocamento permanente de átomos e moléculas (Mano & Mendes 1999) devido a escorregamentos ou rearranjo das cadeias, ruptura de ligações, rotação e difusão (Kay et al 2004, Hult 1966). Esse fenômeno ocorre preferencialmente na região amorfa, onde há maior liberdade de movimento dessas cadeias (Den Hoedt 1986). Porém, este processo pode ser observado também no interior das regiões cristalinas, como no caso das poliolefinas (Abramento 1995).

Os resultados dos ensaios de fluência normalmente são apresentados na forma de curvas típicas de *deformação x tempo* ( $e \times t$ ) ou curvas de *taxa de deformação x tempo* ( $\frac{de}{dt} \times t$ ). Em ambos os casos é visível a presença de três fases no processo, como pode ser observado esquematicamente na Figura 3.4. São elas: *Fluência primária (I)*, *fluência secundária (II)* e *fluência terciária (III)*.

Segundo Van Vlack (1984), no primeiro estágio de deformação (fluência primária) dá-se um ajuste plástico relativamente rápido nos pontos de concentração de tensões dos contornos de grão e falhas internas. Ao se esgotarem, os ajustes plásticos iniciais dão lugar a uma taxa de deformação lenta, quase constante (aceita-se como tal). Este segundo estágio (fluência secundária) continua por um prolongado período até desenvolver uma deformação suficiente para promover um afinamento e uma redução da área. Com esta variação de área

à carga constante, a taxa de deformação aumenta até a ruptura – fluência terciária. Se o carregamento pudesse ser ajustado de modo a se tornar coerente com a redução da área, mantendo assim uma tensão constante, a taxa de fluência secundária continuaria até a ruptura.

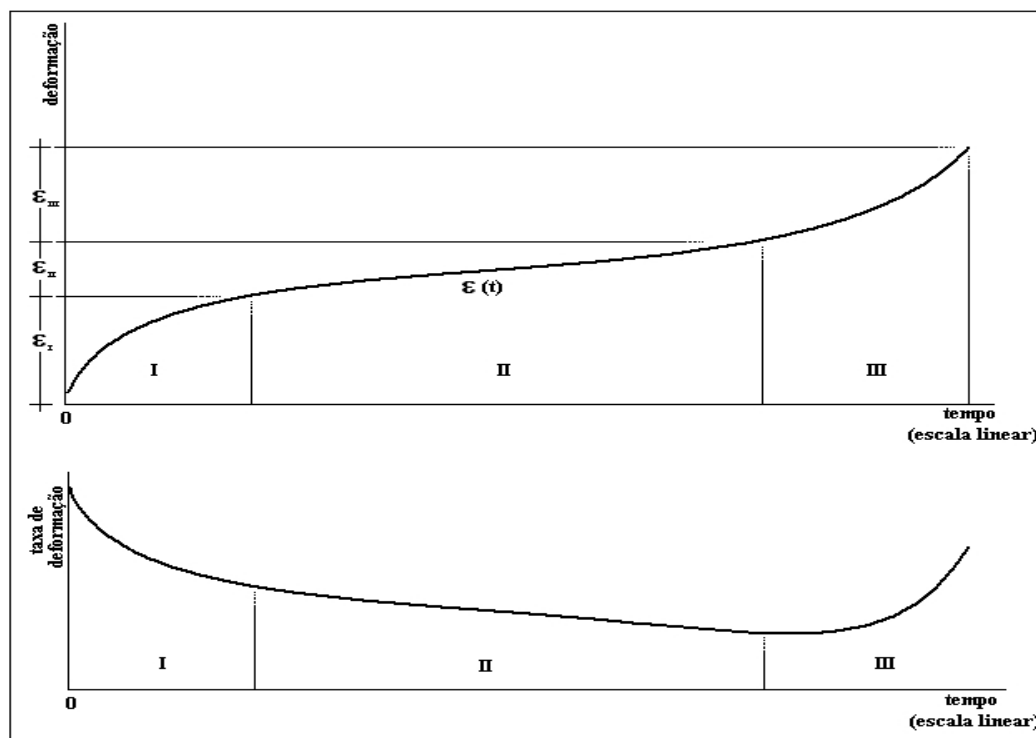


Figura 3.4 – Curvas esquemáticas de ensaios de fluência.

Cazzuffi et al (1997), em estudo sobre fluência de geossintéticos demonstraram a seguinte formulação para expressar a deformação total ( $\epsilon$ ) em um tempo  $t$ :

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}_0 + \mathbf{e}_I + \mathbf{e}_{II} + \mathbf{e}_{III} \quad (3.1)$$

onde  $\epsilon_0$  é a deformação instantânea composta pela parcela plástica e elástica da deformação que ocorre instantaneamente após o carregamento e  $\epsilon_I$ ,  $\epsilon_{II}$  e  $\epsilon_{III}$  as deformações devido à fluência primária, secundária e terciária, respectivamente.

À medida que se aumentam as *tensões aplicadas* e a *temperatura* de ensaio, a taxa de fluência e a deformação total na ruptura crescem e o tempo relativo à fluência terciária diminui (Van Vlack 1984). Isso pode ser observado esquematicamente na Figura 3.5.

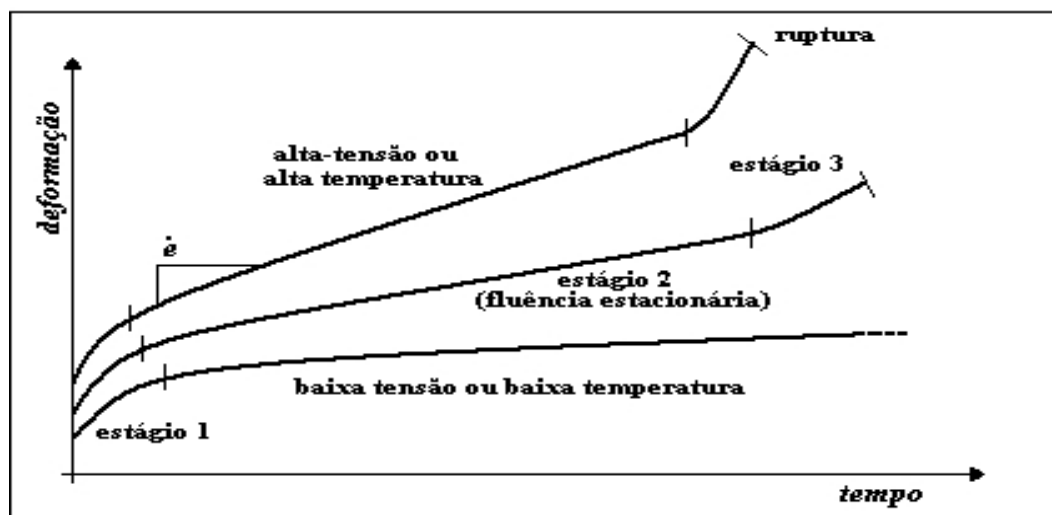


Figura 3.5 – Exemplo esquemático do comportamento em fluência em função da tensão ou temperatura (Van Vlack 1984).

É comum a utilização de curvas isócronas para demonstração de resultado de ensaios de fluência. Um exemplo é a curva isócrona de *tempo T* na análise de *carga x deformação*. Sua obtenção é feita tomando-se pontos equitemporais nas curvas *deformação x tempo* referentes a diferentes cargas, sob uma mesma temperatura. A Figura 3.6 ilustra melhor este processo.

O efeito da temperatura nos polímeros está relacionado com a estrutura das cadeias e a mobilidade molecular. À medida que se eleva a temperatura de uma massa polimérica, aumenta a energia e a movimentação relativa das moléculas. Esse fenômeno se acentua em temperaturas superiores à de transição vítrea ( $T_g$ ), porém está associado também ao grau de cristalinidade do polímero. As regiões cristalinas podem apresentar forças intermoleculares elevadas que ainda assim promovam um aparente “travamento” das moléculas. (Crawford 1998)

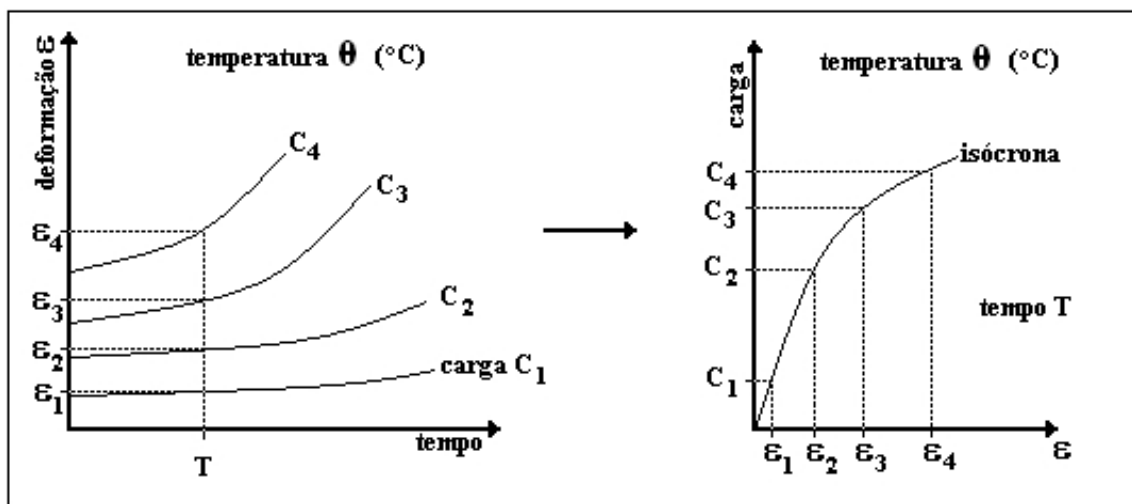


Figura 3.6 – Representação esquemática da obtenção de curvas isócronas (Baras 2001 – adaptado).

Algumas análises permitem que sejam utilizados incrementos de temperatura visando assim, entre outros aspectos, reduzir o tempo de ensaio. Uma dessas técnicas é a conhecida como Stepped Isothermal Test (SIM), que vem sendo bastante utilizada em trabalhos com geossintéticos (Thornton et al 1998a, Thornton et al 1998b, Schröer et al 2000, Baras 2001, Greenwood 2002). Em termos práticos, inicia-se o ensaio de fluência nos moldes do ensaio convencional a uma temperatura inicial constante. Após aparente estabilização das deformações promove-se um súbito aumento da temperatura, que gera uma nova curva de deformações, contendo os três estágios principais (fluência primária, secundária e terciária). Ao verificar uma nova estabilização, repete-se o processo.

O resultado é uma seqüência de curvas, como ilustrado na Figura 3.7 (a). A curva final *deformação x tempo* (Figura 3.7 (b)) é obtida após ajustes matemáticos.

Em se tratando de análise de ruptura por fluência de geotêxteis, Costa et al (2003) alertam para o fato de existir uma grande variabilidade nos resultados dos ensaios, mesmo quando o procedimento adotado estiver inteiramente de acordo com as normas.

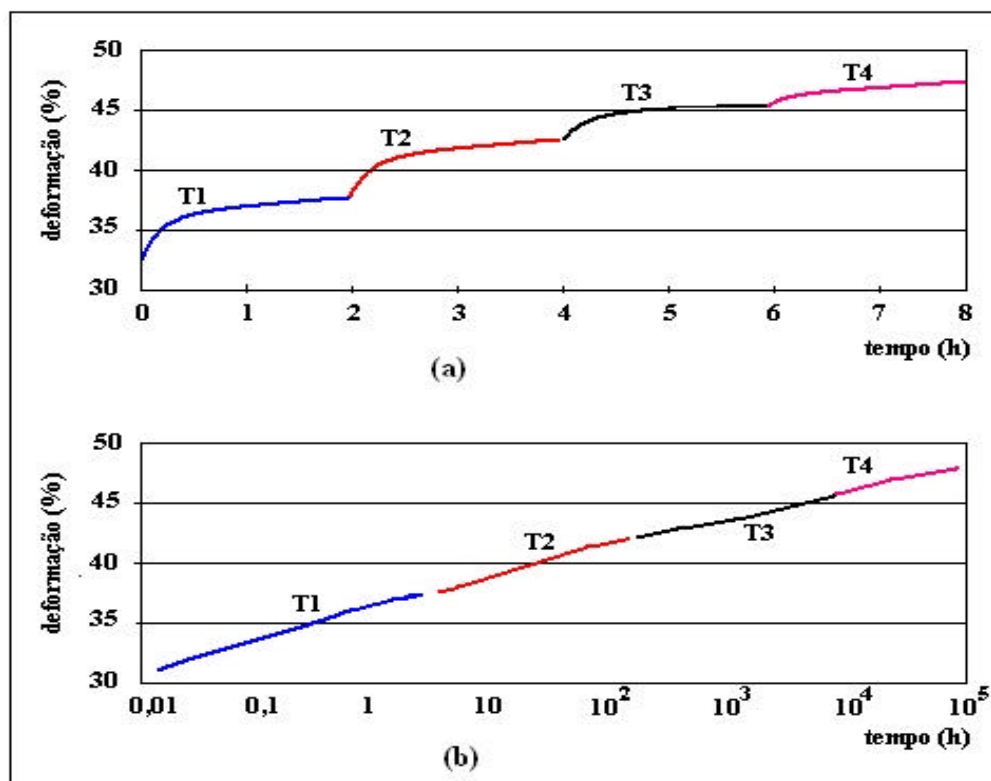


Figura 3.7 – (a) resultado esquemático do ensaio de fluência utilizando a técnica SIM com quatro patamares de temperatura. (b) curva de fluência final, após tratamento gráfico. (Baras 2001)

### 3.3.3 Danos no processo de instalação

Os danos ocorridos durante o processo de instalação são, em sua grande maioria, decorrentes de acidentes, queda de material pontiagudo e do próprio processo construtivo que inclui passagem de maquinário, trânsito de operários, compactação, etc. No caso de aplicação em reforço, os principais fatores que afetam a intensidade do dano são: o tipo de geotêxtil, ou geogrelha, a espessura da camada de solo a ser compactado sobre o geossintético, o peso dos equipamentos e a granulometria e angulosidade do material de aterro (Abramento 1995<sup>2</sup>).

Rollin et al. (1999) investigaram 241000m<sup>2</sup> de obras com geomembranas e relataram uma média de 2 vazamentos por hectare, onde 25% dos danos eram furos e cerca de 20% cortes, provocados por queda de instrumentos pontiagudos. A pesquisa foi desenvolvida após implementação do CQA (programa de qualidade de construção). Estudos prévios a esse



programa, citam obras com até 22 vazamentos por hectare (Laine & Darilek 1993, Peggs 1993).

Ainda não existe um consenso sobre a simulação em laboratório deste tipo de solicitação. É mais freqüente observar ensaios direcionados para uma obra específica. Uma tentativa de padronização foi feita pelo CEN (Comitê Europeu de Normalização) que publicou, em 1998, um relatório técnico (ISO/TR 10722-1) indicando um procedimento para simular danos severos durante a instalação de um material granular sobre uma camada de geossintético. O relatório recomenda aplicar a um corpo-de-prova de geossintético situado entre camadas de óxido de alumínio sinterizado, um carregamento cíclico variando de 5 a 900 kPa na freqüência de 1Hz para 200 ciclos.

Paula et al (2004) realizaram ensaios, seguindo o procedimento sugerido neste relatório, para 3 (três) tipos de geotêxteis não tecidos, com diferentes valores de massa por unidade de área. Diferentemente do recomendado no relatório, que prevê o uso de materiais de danos sintéticos, neste caso foram utilizados dois diferentes materiais granulares naturais, mal graduados e com diâmetro dos grãos variando entre 4,75mm e 12,5mm. Dois valores de energia de compactação foram utilizados. Os resultados demonstraram que a natureza dos agregados e a energia de compactação interferem de forma significativa no valor da resistência dos geotêxteis. Notou-se também que, essas variáveis têm maior influência em geotêxteis de menor massa por unidade de área. Na Figura 3.8 é possível observar a situação dos filamentos de poliéster de uma geogrelha para aplicação em reforço após processo de danos segundo a ENV 10722-1 parcialmente modificada (Greenwood 2002).

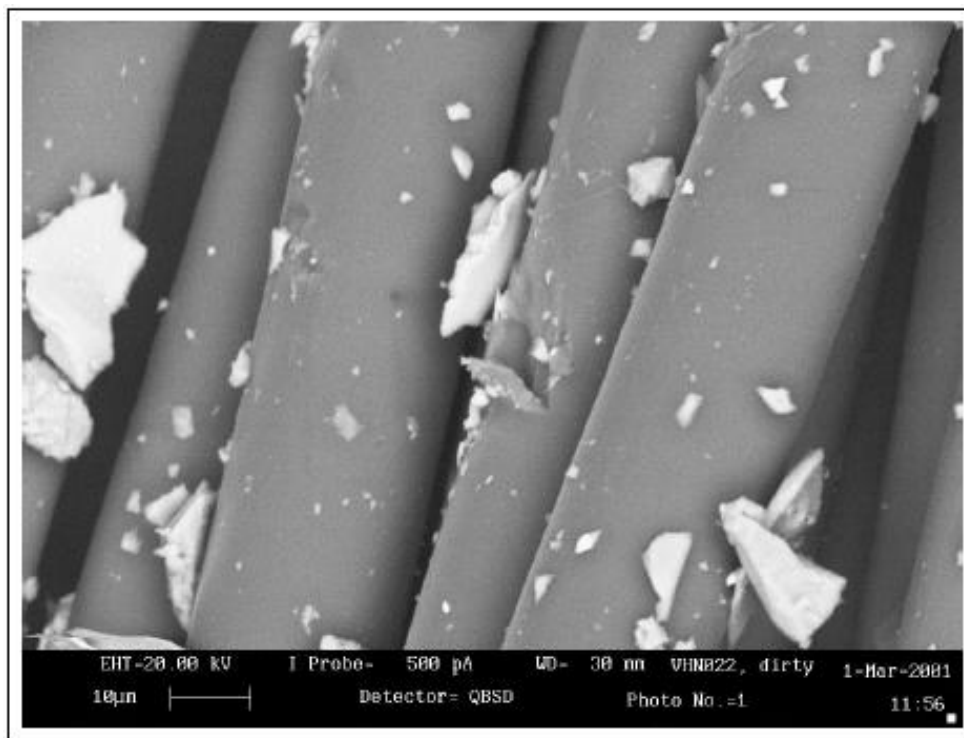


Figura 3.8 – Foto do efeito da degradação mecânica em fibras de poliéster (Greenwood 2002).

### 3.3.4 O Meio Ambiente

Os geossintéticos, principalmente aqueles utilizados como reforço de estruturas de solo, estão predominantemente enterrados. Isso concede benefícios no ponto de vista de agressão por raios ultra-violeta e variações térmicas elevadas. Mas, por outro lado, o contato direto com o solo favorece ataques químicos e biológicos muitas vezes, advindos da própria constituição do solo.

Os solos, em geral, possuem uma taxa média de matéria orgânica variando entre 1% e 10%, mas podendo chegar até a 50% da constituição do solo. Nestes casos ocorre significativa presença de microorganismos favorecendo a degradação microbiológica.

A fração inorgânica, composta em sua grande maioria por ácidos, bases, gases, íons metálicos, oxigênio e água, podem afetar drasticamente o poder reativo do solo, fazendo com que o pH atinja extremos de 3 e 10. Há ainda, alguns minerais que respondem pela alcalinidade do solo, como pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Minerais, compostos, formulação e respectivos valores de pH (ISO/TR 13434 1998).

<i>Mineral</i>	<i>Composto</i>	<i>Formulação</i>	<i>PH</i>
	Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	9-10
Feldspatos	Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	8
	Ortoclásio	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	8-9
Quartzo	Areia	$\text{SiO}_2$	7
	Muscovita	$\text{KA}_2\text{SiO}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	7-8
Argilas	<i>Caulinita</i>	$\text{Al}_2\text{SiO}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5-7
Carbonatos	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	9-10
	calcita	$\text{CaCO}_3$	8-9

Diversos estudos (Billing et al 1990, Halse et al 1987, Melo 1990, Elias et al 1998) apontam para a sensibilidade dos geotêxteis, principalmente os de poliésteres, às soluções extremamente alcalinas. Melo (1990), em sua pesquisa, verificou uma perda significativa de resistência em geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster quando mergulhados em soluções de  $\text{NH}_4(\text{OH})$ ,  $\text{NaOH}$  e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de elevado pH. Esse fenômeno foi atribuído principalmente ao processo de hidrólise, que resulta em uma perda de massa molecular e conseqüente perda de resistência (Salman et al. 1997). Um estudo semelhante realizado por Carneiro et al (2004) só que em geotêxteis de polipropileno não alertou para significativas variações no comportamento em curto prazo das amostras ensaiadas. Em relação à ambientes ácidos, Mancini e Zanin (2002), observaram uma despolimerização de 98% em flocos de PET após cinco horas de reação em solução aquosa de hidróxido de sódio (pH 13,5) à 100°C e 1atm, enquanto que em soluções de ácido sulfúrico (pH 0,6), após cinco dias reagindo em iguais condições, a despolimerização foi inferior a 80%.

Em praticamente todos os casos, as pesquisas foram conduzidas utilizando valores extremos de pH, superiores inclusive, aos encontrados no solo. Isso poderia gerar polêmicas em relação à aplicação prática dos resultados. Porém é preciso levar em consideração o fator

*tempo*, que normalmente se estende por dezenas de anos, e também o risco de um contato acidental com substâncias químicas indesejáveis, tais como resíduos industriais, rejeitos líquidos urbanos, etc. Essas soluções podem facilmente atingir patamares críticos de alcalinidade. Cabe salientar que produtos comumente encontrados no comércio e utilizados sem restrições como, por exemplo, a cal e a soda cáustica, quando em contato com água são capazes de produzir soluções com pH superior a 12.

Diversas considerações a respeito da problemática da degradação devido às ações ligadas ao meio ambiente podem ser vistas na ISO/TR 13434 1998, uma norma que abrange praticamente todos os aspectos importantes e essenciais de serem considerados.

### **3.3.5 Sinergia**

Os primeiros estudos envolvendo fatores de redução para os geossintéticos consideravam apenas as solicitações e efeitos degradativos atuando isoladamente sobre o produto. A própria metodologia de cálculo proposta para essa análise (equação 3.1), ainda hoje, considera apenas a possibilidade de sinergia entre os FR`s através de um Fator de Segurança, normalmente superior à unidade. Vários autores já têm alertado para a necessidade de se estudar, compreender e quantificar esse fenômeno garantindo maior segurança e, em alguns casos, gerando economia com projetos mais refinados.

## **3.4 Casos de estudo da sinergia entre Fatores de Redução**

### **3.4.1 Billing et al. (1990)**

Billing et al. (1990) realizaram um estudo sobre o efeito dos danos de instalação e a degradação química em geossintéticos para aplicação em reforço. Foram analisados 3 diferentes geotêxteis (P1, P2 e P3) e uma geogrelha (P4).

Em uma primeira etapa, os corpos-de-prova foram submetidos a danos simulando o processo de compactação em campo. O passo seguinte foi uma inspeção visual e ensaios de resistência à tração. Em todos os casos houve redução no valor da resistência, como ilustra a Tabela 3.4.

*Tabela 3.4 – Características mecânicas dos Geossintéticos utilizados no estudo.*

<i>Sigla</i>	<i>descrição</i>	<i>massa por unid. de área</i> <i>[g/m<sup>2</sup>]</i>	<i>maior resistência</i> <i>[kN/m]</i>	<i>redução resistência</i> <i>[%]</i>
<b>P1</b>	GT tecido polipropileno	570	186	7
<b>P2</b>	GT tecido polipropileno	240	50	36
<b>P3</b>	GT tecido poliéster	400	200	34
<b>P4</b>	GG polietileno	-	81	18

Ainda nesta etapa, amostras danificadas de P1 e P2 foram submetidas a ensaios para análise da deformação em fluência. As cargas utilizadas corresponderam a 40% e 61% da carga de ruptura para P1 e 40% e 51% para P2. Os resultados estão apresentados nas Figura 3.9 e Figura 3.10 respectivamente.

Em geral, não houve significativas mudanças na forma das curvas. O que se observou foi uma redução de aproximadamente 1% no valor absoluto das deformações iniciais dos corpos-de-prova danificados em relação aos utilizados como controle. Esse fenômeno foi associado ao efeito de compressão pelo processo de compactação e manuseio durante a retirada após degradação mecânica.

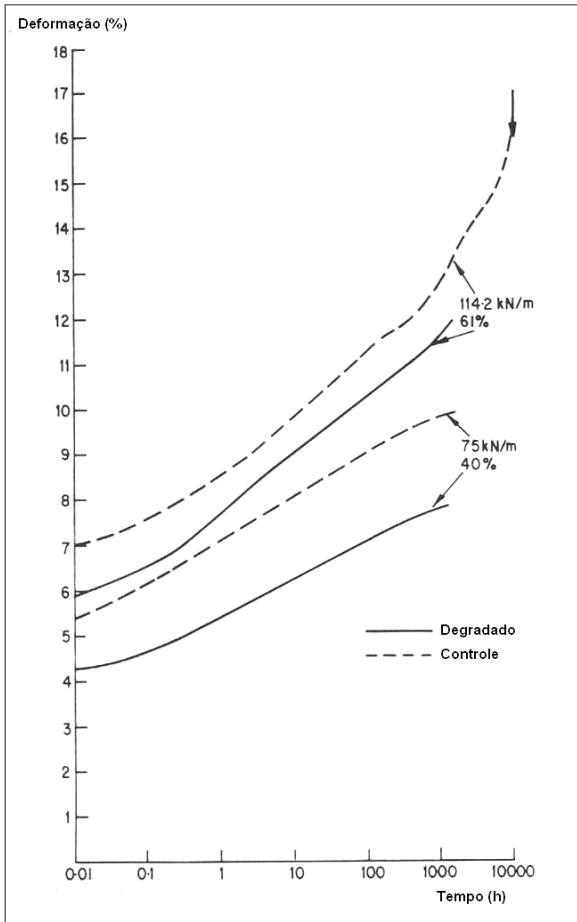


Figura 3.9 – resultados das análises de deformação em fluência em P1.

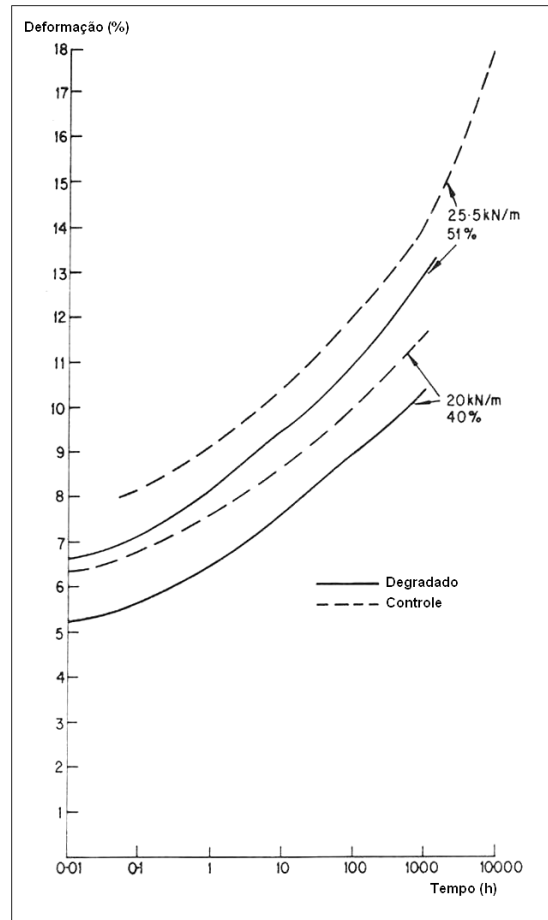


Figura 3.10 – resultados das análises de deformação em fluência em P2.

Na segunda etapa do estudo os autores imergiram amostras intactas em 12 diferentes soluções (Tabela 3.5). Duas séries de ensaios para medir a resistência a tração residual foram feitas: com 60 dias de imersão e após 12 meses. Os resultados que demonstraram maiores variações foram os realizados nas amostras de poliéster (Figura 3.11). Em geral, segundo os autores, a durabilidade dos materiais foi extremamente boa, considerando os valores de pH adotados.

Porém, não há menção no artigo de processos de preparação das amostras como lavagem dos corpos-de-prova ou imersão prévia em solução contendo tensoativos. Isso poderia responder pelo baixo ataque aos polímeros, mesmo considerando situações críticas em longos períodos de tempo.

Tabela 3.5 – Soluções químicas utilizadas.

<i>ref</i>	<i>solução</i>	<i>pH</i>
1	solução de óxido de cálcio	12,3
2	solução de óxido de cálcio + 0,03% em massa de FeSO <sub>4</sub>	12,3
3	solução de carbonato de cálcio	10,0
4	solução de carbonato de cálcio + 0,03% em massa de FeSO <sub>4</sub>	6,0
5	água destilada	7,0
6	água destilada + 0,03% em massa de FeSO <sub>4</sub>	5,0
7	solução de ácido sulfúrico	3,0
8	solução de ácido sulfúrico + 0,03% em massa de FeSO <sub>4</sub>	3,0
9	solução de ácido hidrobenzóico	3,4
10	solução de ácido hidrobenzóico + 0,03% em massa de FeSO <sub>4</sub>	3,4
11	óleo para engrenagens BR SAE 15W/ 40	-
12	óleo combustível BR SAE 40	-

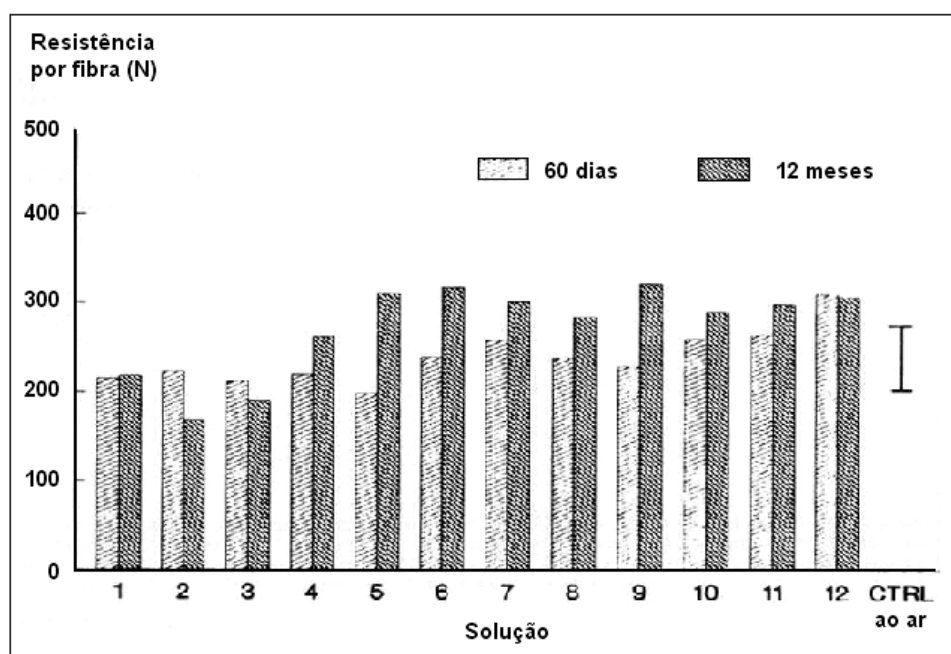


Figura 3.11 – Resistência à tração residual para as amostras P3 após imersão. Legenda dos números das soluções, ver Tabela 3.5.

### 3.4.2 Viezee et al. (1990) e Krumm (1988)

Esses dois estudos analisaram o comportamento em fluência de filamentos de PET antes e após danos mecânicos. O trabalho de Krumm (1988) aqui reportado é uma menção do estudo realizado por Allen & Bathurst (1996), que contém um resumo dos principais artigos publicados sobre o problema da sinergia entre  $FR_{DI}$  e  $FR_{FL}$  até a data da publicação.

Viezee et al. (1990) utilizaram corpos-de-prova extraídos de geotêxteis tecidos. Os danos foram provocados pela compactação de uma camada de areia sobre a amostra, donde cuidadosamente foram retirados os filamentos para análise. Os ensaios de resistência à tração indicaram apenas uma redução no ponto de ruptura, que passou de 78N para 63N após os danos ( $FR_{DI} = 1,23$ ). Os ensaios de fluência revelaram que as deformações iniciais e a taxa de fluência não foram afetadas. Porém, as deformações próximas à ruptura e tempo de ruptura sofreram uma redução. Em geral, os ensaios com corpos-de-prova danificados seguiram a tendência de uma brusca variação no gradiente de fluência em função do carregamento para valores superiores a 60% da carga de ruptura.

Allen & Bathurst (1996), utilizando os dados das pesquisas de Viezee et al. (1990) e Krumm (1988), montaram um resumo do comportamento em fluência dos diversos corpos-de-prova ensaiados, com e sem danos e para diferentes patamares de carregamento (Figura 3.12). No gráfico é possível observar o comportamento frente aos danos e a ocorrência de ruptura para ensaios com cargas superiores a 60% da carga máxima.

Outra análise foi a elaboração de um gráfico comparativo entre o método tradicional de cálculo, onde o fator de redução final é dado pelo produto direto dos fatores de redução parciais e o resultado experimental do efeito combinado, ambos para o caso da fluência e danos de instalação. A Figura 3.13 ilustra essas retas obtidas a partir dos ensaios de fluência em corpos-de-prova antes e após danos mecânicos e a reta resultante do cálculo pelo método tradicional para um  $FR_{DI} = 1,23$ .



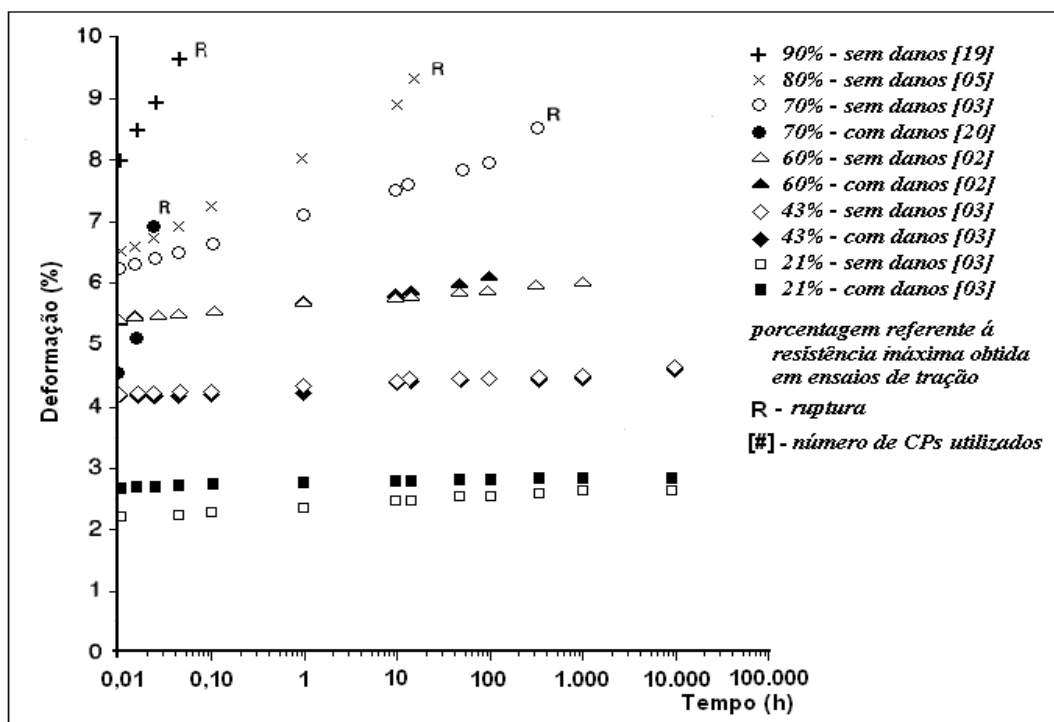


Figura 3.12 – Resultados dos ensaios de fluência em filamentos de PET de Krumm (1988) e Viezze et al. (1990) segundo Allen & Bathurst (1996) – adaptado.

Com vistas nos resultados, o que pôde ser observado é que o método tradicional de cálculo gerou, neste caso, um fator de redução combinado inferior ao obtido nos ensaios considerando a atuação em conjunto dos fatores parciais. Por exemplo, para um tempo de  $10^6$  h, o  $FR_{FL}=1/0,58 = 1,72$ , o  $FR_{DI+FL}=1/0,43 = 2,33$  e  $FR_{DI} \times FR_{FL} = 1,23 \times 1,72 = 2,11$ . Essa diferença de quase 10% tende a aumentar para tempos menores, mas, ainda assim, para todos os pontos está inserida nos limites de confiança da regressão. Porém, isso não exclui a necessidade de se avaliar a aplicabilidade da formulação existente para casos específicos.

O estudo de Viezze et al. contemplou ainda uma análise da possível sinergia existente entre os danos mecânicos ( $FR_{DI}$ ) e ataques químicos ( $FR_{MA}$ ). Corpos-de-prova danificados mecanicamente e igual número sem danos foram imersos em soluções de NaOH e KOH com pH 12 onde permaneceram por 3 meses. Ao final deste período, foram submetidos à fluência com uma carga correspondente a 20% da carga máxima de ruptura em ensaio de tração.

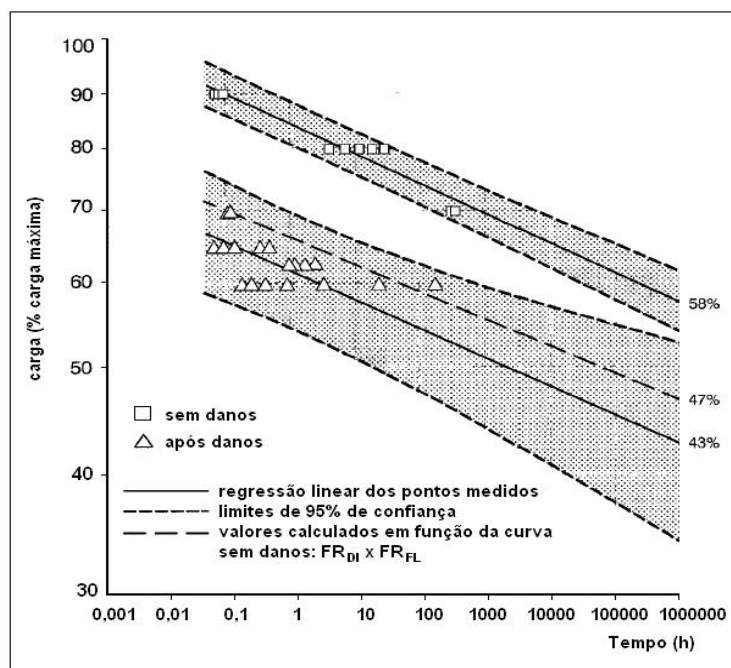


Figura 3.13 – Resultados dos ensaios de análise da ruptura por fluência em filamentos de PET, com as respectivas regressões e limites de confiança (dados de Krumm 1988 – adaptado de Allen & Bathurst 1996).

Os resultados, além de não diferirem significativamente entre si, nem em comparação com os resultados dos corpos-de-prova não imersos, indicaram que não houve influência dos ataques químicos no processo de fluência, sugerindo a não existência de sinergia entre os fatores analisados ( $FR_{SIN}=1$ ).

Novamente, na publicação não há relato do processo de preparação dos corpos-de-prova previamente à imersão e nem se houve preocupação com a manutenção do pH e quebra da tensão superficial dos fios.

### 3.4.3 Allen & Bathurst (1996)

O trabalho desenvolvido por esses autores contemplou duas fases, sendo a primeira uma revisão das publicações acerca dos estudos do efeito combinado entre os fatores de redução

devido a danos de instalação e fluência e a segunda o desenvolvimento e proposição de uma nova metodologia de análises para projetos.

Entre os destaques da revisão bibliográfica estão os trabalhos de Krumm (1988) e Viezee et al. (1990), já explorados no item anterior e o trabalho de Brady et al (1994), que realizou mais de 23000h de ensaios de fluência, utilizando geotêxteis tecidos, de polipropileno (PP) e poliéster (PET) e geogrelhas de polietileno de alta densidade (PEAD). Foram analisados corpos-de-prova de 200 mm sem danos e de mesmas dimensões extraídos de amostras exumadas danificadas mecanicamente por compactação “padrão” com agregado de pedra calcárea (*limestone*). Segundo Allen & Bathurst (1996), os autores concluíram que o número de filamentos rompidos pelos danos não chega a ser suficiente para afetar o comportamento visco-elástico dos geossintéticos, pelo menos após 1000h de ensaio. Isso porque, o efeito da instalação e exumação causa um pré-estiramento das fibras e, também o fato de existir partículas de solo na trama do geotêxteis, incorre em uma redução da deformação inicial de ensaio. Porém, a quantidade de informações disponíveis sobre esse estudo não permite chegar a conclusões acerca do efeito sinérgico existente ou mesmo comparar os resultados de ensaios com as proposições de cálculo.

Já a metodologia de análise proposta pelos autores, prevê a elaboração de curvas isócronas do tipo *tensão x deformação* que considerem o efeito sinérgico dos danos de instalação e fluência. Para isso, seriam necessárias as isócronas em curto e longo prazo dos materiais intactos, a previsão de deformação ao final da vida útil e resistência final de amostras antes e após danos. A vantagem deste tipo de tratamento seria a possibilidade de consideração do comportamento não apenas em valores próximos aos de ruptura, mas também em níveis usuais de carregamento (*working stress levels*).

### 3.4.4 Pinho-Lopes et al. (2000), Pinho-Lopes et al. (2002) e Pinho-Lopes & Lopes (2004)

O estudo que forneceu parâmetros para esses artigos se baseou, mais uma vez, na análise da influência dos danos de instalação no comportamento em curto e longo prazo de diferentes materiais. Nove geossintéticos de aplicação preferencial em reforço foram analisados (Tabela 3.6). Para cada amostra, três processos de danos foram estudados: dois em campo, variando o tipo de solo da camada compactada sobre a amostra e um em laboratório, seguindo as recomendações da ISO/ENV 10722-1 (1997).

Os autores disponibilizaram dados mais consistentes apenas dos materiais 3 e 5, indicando inclusive, resultados das análises em fluência (Figura 3.14 e Figura 3.15 respectivamente). No caso do material 3, os resultados dos ensaios de curto prazo, indicaram uma variação não apenas na resistência final do geossintético, mas também no módulo de rigidez. Isso significa dizer que, em análises do tipo *tensão x deformação*, houve variação na forma da curva, diferentemente do que concluíram Allen & Bathurst (1994) na discussão dos artigos por eles utilizados.

Tabela 3.6 - Geossintéticos utilizados.

<i>Material</i>	<i>Descrição – massa por unidade de área</i>	<i>Resistência nominal* (kN/m)</i>
1	Geotêxtil tecido de polipropileno – 110 g/m <sup>2</sup>	22
2	Geotêxtil tecido de polipropileno – 210 g/m <sup>2</sup>	40
3	Geotêxtil tecido de polipropileno – 320 g/m <sup>2</sup>	65
4	Geogrelha tecida de PET	60
5	Geogrelha tecida de PET	55
6	“ <i>coated aramid embedded in PET nonwoven</i> ”	40
7	Geogrelha extrudada de polipropileno	40
8	Filamento com miolo de PET revestido com polipropileno	50
9	Geogrelha extrudada de polipropileno	20

\* *sentido de fabricação*

Com o estudo do comportamento em longo prazo foi possível realizar novamente uma análise comparativa entre os efeitos sinérgicos de danos de instalação e fluência, para os resultados de caráter experimental e os obtidos pelo método tradicional de cálculo (já explorado no item 3.4.3). Pinho-Lopes et al. (2000) discutiram neste aspecto e propuseram que essa análise sinérgica seja utilizada como uma nova forma de se obter tais fatores de redução. O cálculo difere do realizado por outros autores apenas na consideração da resistência máxima que, neste caso é referente ao tempo  $t=1$  min na regressão linear dos pontos de ruptura por fluência dos corpos-de-prova. A consideração usual utiliza a resistência máxima (100%) obtida em ensaios de tração.

O cálculo do efeito conjugado assim segue:

(1) método tradicional:  $FR_{DI} \times FR_{FL}$  onde  $FR_{DI} = T_{ult}/T_{ult}^*$  e  $FR_{FL} = 100/T_t$ , sendo:  $T_{ult}$  a resistência à tração em ensaio rápido,  $T_{ult}^*$  a resistência à tração em ensaio rápido após danos e  $T_t$  a porcentagem da resistência máxima a tração no tempo  $t_n$  em ensaios de ruptura por fluência;

(2) método de consideração sinérgica tradicional para análises comparativas:  $FR_{DIFL} = 100/T_t^*$ , sendo  $T_t^*$  a porcentagem da resistência máxima a tração no tempo  $t_n$  em ensaios de ruptura por fluência em amostras danificadas;

(3) método proposto por Pinho et al. (2000):  $FR_{DIFL} = T_1/T_n^*$ , sendo  $T_1$  a resistência a tração após 1 min no ensaio de ruptura por fluência em amostras intactas e  $T_n^*$  a resistência a tração após “n” anos, no ensaio de ruptura por fluência em amostras danificadas.

A Tabela 3.7 contém os fatores de redução calculados a partir dos dados disponibilizados nos três artigos discutidos neste item. Utilizando a Figura 3.14 e a Figura 3.15 foi possível fazer uma análise comparativa da sinergia entre  $FR_{DI}$  e  $FR_{FL}$  em função do método tradicional (1), ora utilizando a metodologia comum à maioria dos autores e que

considera o valor da resistência máxima do geossintético (método 2), ora através da variação proposta por Pinho-Lopes et al. (2000) (método 3).

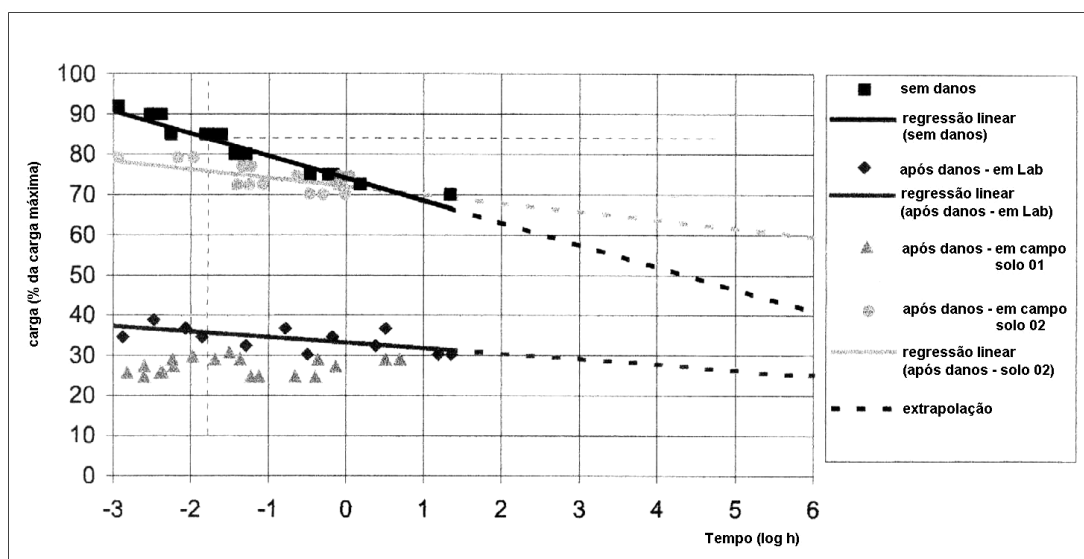


Figura 3.14 – Resultados dos ensaios de fluência em um geotêxtil tecido de Polipropileno (320g/m²) para amostras intactas e após danos (Pinho – Lopes et al. 2002 – adaptado).

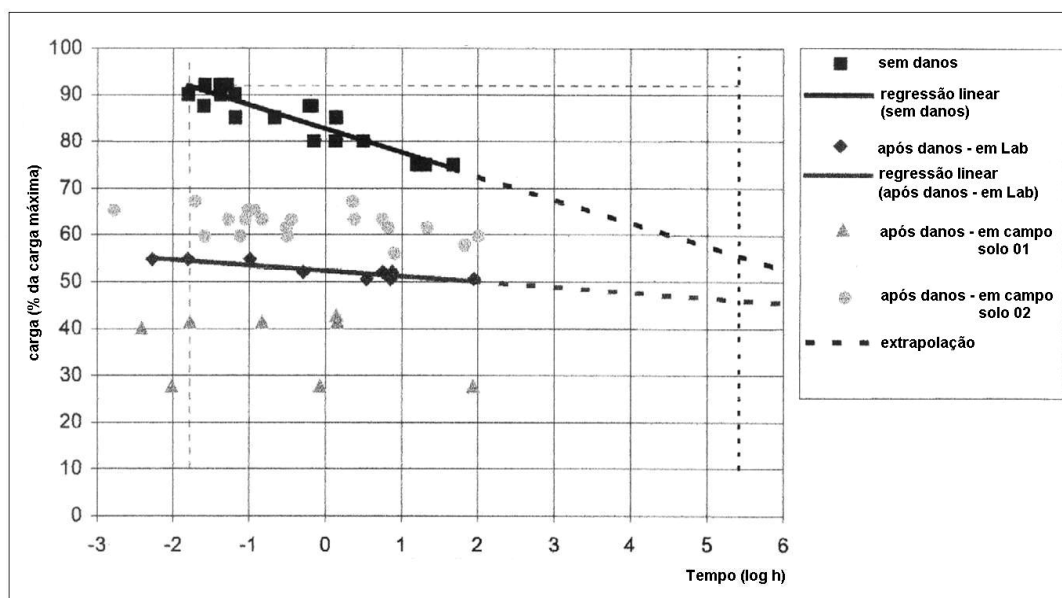


Figura 3.15 - Resultados dos ensaios de fluência em uma geogrelha de PET para amostras intactas e após danos (Pinho – Lopes et al. 2002 – adaptado).

Pinho-Lopes et al. (2000) adotaram uma vida útil da obra estimada em 30 anos para efeito comparativo entre as análises. Ambos os resultados indicaram que a metodologia atual de cálculo é conservadora, quando comparada com as outras análises de sinergia entre danos de instalação e fluência.

Porém, é preciso destacar que a metodologia utilizada por Pinho-Lopes et al. (2000) segue, em parte, contra os próprios conceitos dos fatores de redução. Considerar valores para resistência máxima diferentes daqueles obtidos em ensaios de tração normalizados (ensaios rápidos) seria válido apenas para uma situação onde os ensaios realizados tivessem como objetivo representar uma situação de projeto específica. Ou seja, isso seria considerado uma “*decisão de projeto*”. No caso de proposição de fatores a aplicar, isso pode gerar erros que vão contra a segurança. Por exemplo, um geotêxtil com resistência a tração de 100 kN/m obtidos em ensaio rápido, de acordo com a NBR 12824/1993 e, hipoteticamente, em ensaios de ruptura a fluência, resista a 92kN/m após 1min e 50 kN/m extrapolando para 100 anos, teria como fatores de redução devido à fluência 2,0 e 1,84 para a metodologia padrão (método 2) e a utilizada por Pinho-Lopes et al. (2000), respectivamente. Ao aplicar, em um projeto, o fator de redução então recomendado por esses autores, para o mesmo geotêxtil e mesmas condições, teríamos uma resistência estimada em 100 anos de 54,34 kN/m, cerca de 10% acima do valor “real” (extrapolação pelo ensaio de fluência).

*Tabela 3.7 - Fatores de redução devido aos danos de instalação e devido à fluência.*

<i>Tipo de Fator de Redução</i>	<i>material 3</i>		<i>material 5</i>	
	Método (2) (114 anos)	Método (3) (30 anos)	Método (2) (114 anos)	Método (3) (30 anos)
DI - laboratório	2,70	2,37	1,79	1,68
DI - Campo (solo 02)	1,28	1,11	1,51	1,41
FL	2,50	1,90	1,92	1,67
DIFL - Lab	4,00	3,26	2,22	1,99
DIFL – campo (solo 02)	1,69	1,38	1,75	1,58
<b>DI x FL - Lab</b>	<b>6,75</b>	<b>4,50</b>	<b>3,44</b>	<b>2,81</b>
<b>DI x FL – campo (solo 02)</b>	<b>3,20</b>	<b>2,11</b>	<b>2,90</b>	<b>2,36</b>

### 3.4.5 Schröer et al (2000) e Greenwood (2002)

Esses dois estudos seguiram a mesma linha de pesquisa utilizada pelos autores supracitados, que focaram seus objetivos na compreensão da sinergia entre os danos de instalação e o comportamento em fluência dos geossintéticos. Novamente, foi avaliado o método de cálculo tradicional em função dos resultados obtidos em experimentação e, além disso, ambos os autores fizeram as análises de fluência (ou parte delas) utilizando a técnica de análise acelerada conhecida como *Stepped Isothermal Method (SIM)* melhor detalhada no item 3.3.2.

Schröer et al. (2000) utilizaram geogrelhas tecidas de poliéster de alta tenacidade revestidas com PVC e massa por unidade de área média de 352g/m<sup>2</sup>. Os danos foram causados por dois métodos diferentes: ISO/ENV 10722-1 (1997) e o proposto por Watts & Brady (1994), sendo este último baseado em simulação de campo, com processo de compactação e exumação. As análises de ruptura em fluência foram, em parte, produtos de ensaios convencionais e também, resultado de ensaios tipo SIM. Os ensaios de tração foram realizados à velocidade de 10% de deformação por minuto.

Greenwood utilizou um geotêxtil não-tecido de polipropileno, reforçado por feixes de poliéster costurados não revestidos, de aplicação em reforço ("*polyfelt PEC 35*"). Os danos de instalação foram também simulados segundo a ISO/ENV 10722-1, porém, em corpos-de-prova reduzidos devido às dimensões do equipamento de ensaios de fluência tipo SIM.

Os resultados dos ensaios de fluência são aqui apresentados nas Figura 3.16 e Figura 3.17 para Schröer et al. e Greenwood, respectivamente. A partir das retas obtidas, foi possível calcular os fatores de redução devido à fluência isolada e devido ao efeito conjugado dos danos mecânicos e fluência para um período de tempo de 114 anos aproximadamente (10<sup>6</sup> h). Esses valores estão na Tabela 3.8 que traz também os resultados do método tradicional de cálculo para esse efeito sinérgico (em negrito), a partir dos valores dos FR<sub>DI</sub>.



Neste caso, mais uma vez o método tradicional de cálculo se mostrou conservador em todas as análises, mas com grandes variações, apresentando reduções de 7 a 25%. Ficou evidente também, a influência do tipo de dano e do geossintético utilizado.

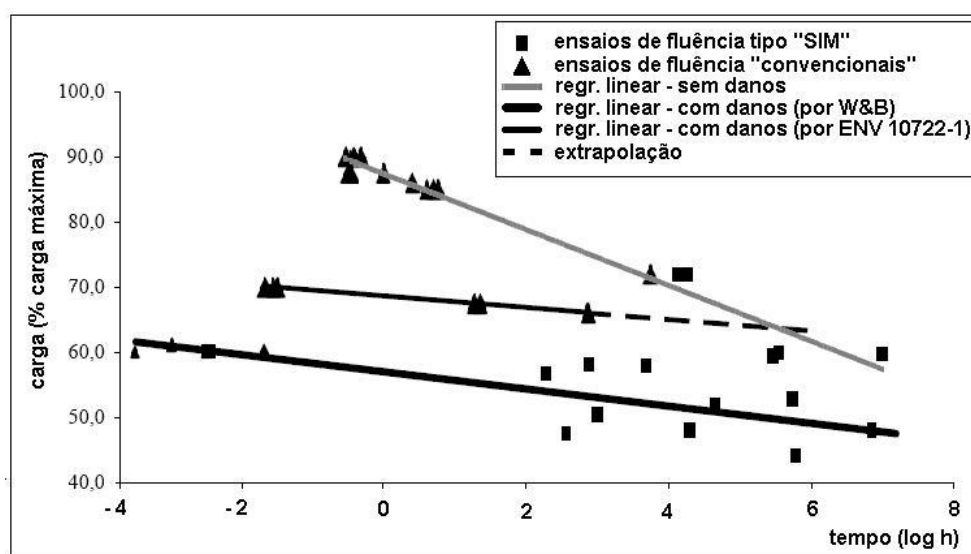


Figura 3.16 – Resultados dos ensaios de ruptura por fluência para amostras intactas e após danos mecânicos em geogrelhas de poliéster (Schröer et al. 2000 – adaptado).

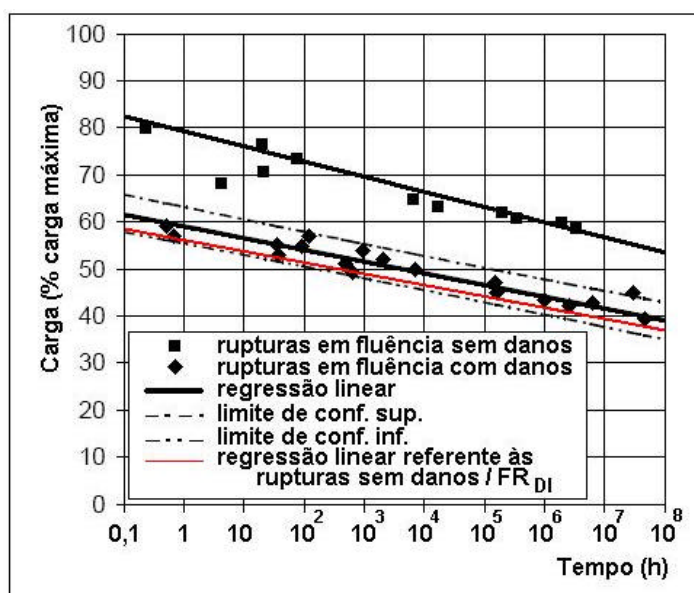


Figura 3.17 - Resultados dos ensaios de fluência (SIM) para amostras intactas e após danos mecânicos em geotêxteis de polipropileno reforçados com poliéster (Greenwood, 2002 – adaptado).

Tabela 3.8 – Fatores de Redução devido aos danos de instalação, à fluência e ao efeito combinado.

Corpos-de-prova	Schröer et al.		Greenwood	
	% resist. tração max	FR	% resistência tração max.	FR
DI - Intactos	100	1,00	100	1,00
Após DI - Watts & Brady	67,6	1,48	-	-
Após DI - ISO 10722-1	77,5	1,29	70,4	1,42
FL* - Intactos	61,7	1,62	58,8	1,70
DIFL* - Watts & Brady	49,0	2,04	-	-
DIFL* - ISO 10722-1	63,7	1,57	44,24	2,26
<b>DI x FL* - Watts &amp; Brady</b>	<b>41,7</b>	<b>2,40</b>	-	-
<b>DI x FL* - ISO 10722-1</b>	<b>47,8</b>	<b>2,09</b>	<b>41,5</b>	<b>2,41</b>

\* valores referentes a 114 anos ( $10^0$  h).

### 3.4.6 East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)

Nestes casos, o foco das pesquisas foi o problema da hidrólise em meio alcalino que ocorre em filamentos de poliéster. Ou seja, o fator de redução envolvido nesta análise passou a ser aquele referente à degradação por meio ambiente ( $FR_{MA}$ ) e não mais devido aos danos mecânicos causados no processo de instalação. O diferencial destes trabalhos está no fato de que os autores buscaram compreender o efeito de diferentes níveis de tensão nos filamentos durante o processo de hidrólise.

Em comum, duas amostras de poliéster (PET) foram utilizadas, sob a forma de filamentos de alta tenacidade:

PET 1 – Trevia (HOECHST), 1100dtex, tipo-730 e,

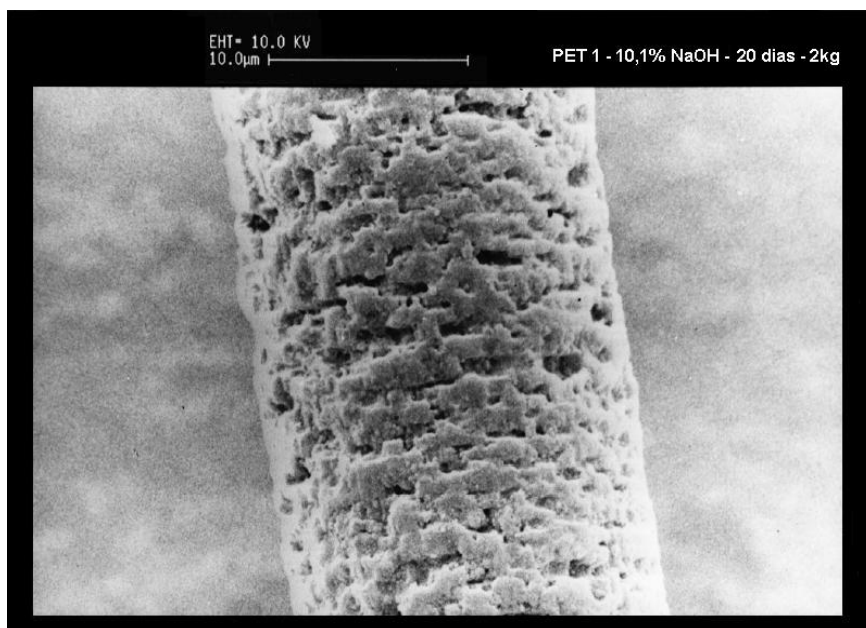
PET 2 – Tergal Tech (RHONE POULENC), 1000dtex, tipo-156.

A solução reagente alcalina foi preparada utilizando NaOH, variando a concentração.

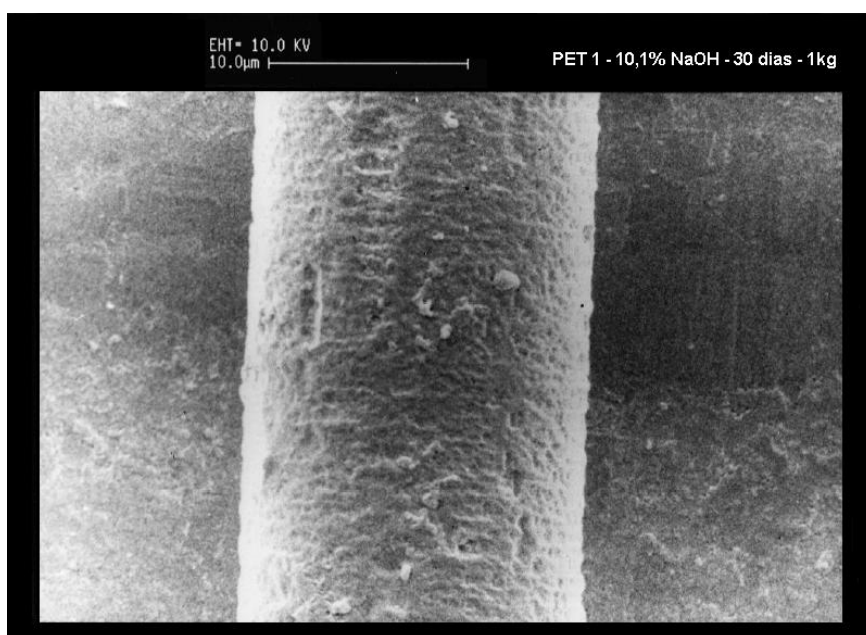
Os corpos-de-prova foram enrolados em tubos de aço inoxidável perfurados, com uma carga pendurada na extremidade livre do filamento. Desta forma, foi possível aplicar uma

tensão conhecida igualmente distribuída ao longo de todo o filamento. Após esse processo, os tubos com os corpos-de-prova foram imersos em soluções alcalinas e checados periodicamente. Os autores alertam para o processo de relaxação, que resultou em perda de tensão ao longo do ensaio.

Na Tabela 3.9 encontram-se os resultados das análises mecânicas de East & Rahman em corpos-de-prova tipo PET 1 após degradação por hidrólise, em solução 10,1% de NaOH. Os valores são dados em função do tempo de exposição e carga aplicada durante a preparação dos corpos-de-prova, previamente à imersão. É fácil observar que houve um aumento na perda de massa e diminuição da resistência, à medida que se elevou a tensão inicial dos filamentos. O tempo de exposição também exerceu influência, elevando as taxas de degradação. Porém, ao observar as Figura 3.18 e Figura 3.9, fica nítido que o efeito da carga inicial é predominante, visto a degradação provocada na superfície dos fios, em 20 dias e 2kg de carga aplicada e 30 dias e 1kg de carga, respectivamente. No primeiro caso, houve um total comprometimento da camada superficial do filamento. Outro fator que merece destaque é a comparação entre os dados de Rahman & Alfaro (2004), representado em **negrito** nesta tabela: para idêntica situação de temperatura, reagentes e amostra, nota-se uma maior perda de massa mesmo em se tratando de tempos de imersão semelhantes. Essa diferença foi atribuída exclusivamente à lavagem no processo de preparação das amostras, utilizado apenas no segundo estudo. Houve a preocupação de recorrer a uma metodologia padrão de lavagem, realizada em uma máquina rotativa de  $40 \pm 2$  rpm, com 550ml de uma solução contendo 2g/l de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e igual quantidade de “*sandosin*” (produto de limpeza, porém sem especificação da composição).



*Figura 3.18 – Amostra de PET 1, após 20 dias de imersão em solução 10,1% de NaOH, à temperatura ambiente e 2kg de carga inicial – East & Rahman (1999.)*



*Figura 3.19 - Amostra de PET 1, após 30 dias de imersão em solução 10,1% de NaOH, à temperatura ambiente e 1kg de carga inicial – East & Rahman (1999).*

Tabela 3.9 – Resultados das análises de redução na resistência à ruptura por tração e perda de massa – dados de East & Rahman (1999) para PET 1 em solução 10,1% de NaOH à temperatura ambiente.

Carga aplicada “pré- imersão ” (g)	10 dias			20 dias			30 dias		
	carga rupt. (cN)	redução (%)	perda de massa (%)	carga rupt. (cN)	redução (%)	perda de massa (%)	carga rupt. (cN)	redução (%)	perda de massa (%)
ref.	48,6	-	-	48,6	-	-	48,6	-	-
0	40,9	16,4	11,4	35,9	26,1	<b>22,0</b> <b>37,6*</b>	30,2	37,9	<b>31,6</b> <b>53,0**</b>
100	38,2	21,4	12,2	27,6	43,3	25,4	27,4	43,7	35,9
500	37,8	22,1	11,2	28,3	41,8	21,1	24,9	48,7	34,1
1000	33,8	30,4	11,4	29,1	40,1	22,0	21,7	55,4	34,3
1500	26,9	44,6	12,9	-	-	-	-	-	-
2000	16,7	65,7	13,9	7,3	85,0	20,2	*	*	45,9

\* Resultado das análises de Rahman & Alfaro para PET 1 (447 horas)

\*\* Resultado das análises de Rahman & Alfaro para PET 1 (792 horas)

A partir dos dados da Tabela 3.9 é possível fazer um paralelo com a carga aplicada pré-imersão e tempo de ruptura, que possibilitam uma análise comparativa dos resultados representados pelos autores. O objetivo deste procedimento é, entre outros, permitir uma visão do comportamento na ruptura dos corpos-de-prova em função da carga aplicada, algo próximo a uma análise de fluência. Para tanto, é necessário considerar que as cargas se mantêm constante ao longo de todo o ensaio, e com isso, a relaxação é necessariamente desprezada.

O primeiro passo para elaboração do gráfico supracitado é encontrar os tempos das prováveis rupturas, nas condições do ensaio (carga e ataque químico), em uma hipotética situação de degradação total dos corpos-de-prova. Assim sendo, os valores de resistências residuais foram plotados em função do tempo de imersão (10, 20 e 30 dias). Três análises foram consideradas:

- (a) Em escala logarítmica (Figura 3.20);
- (b) Em escala linear, nos moldes da logarítmica, para fins de comparação (Figura 3.21);

(c) Em escala linear considerando o ponto de resistência máxima ( $t = 0$ ) (Figura 3.22).

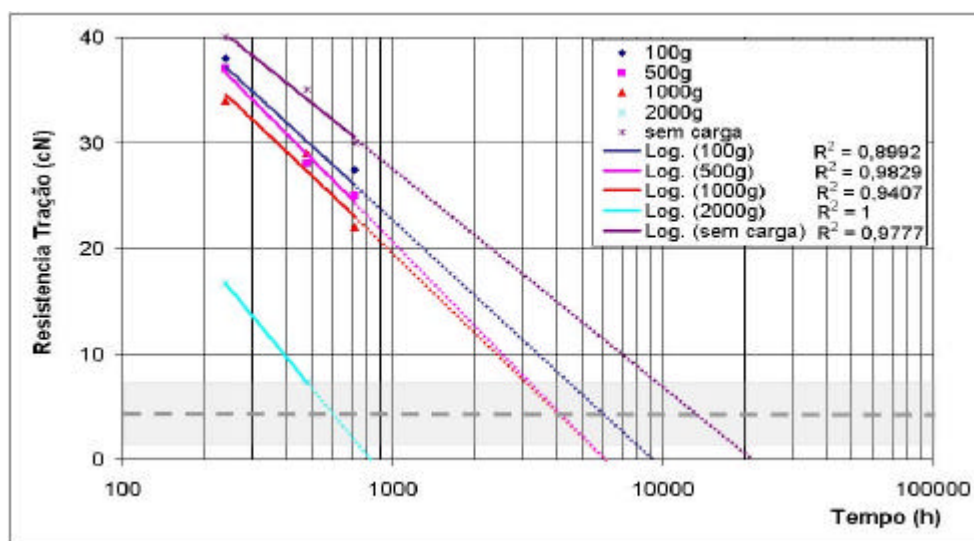


Figura 3.20 - Expectativa de ruptura para diferentes carregamentos pré-imersão em escala logarítmica (dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)).

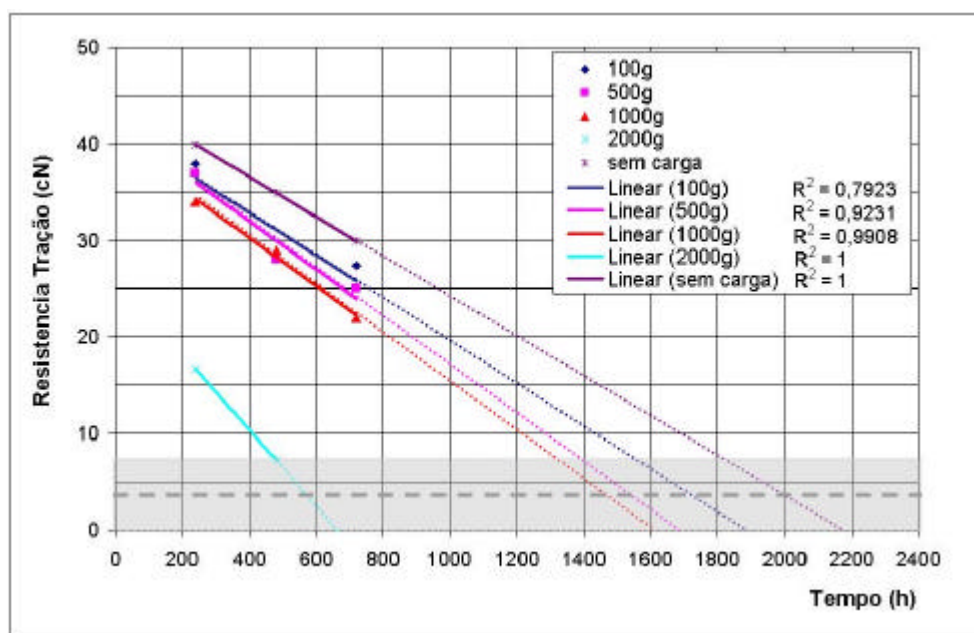


Figura 3.21 - Expectativa de ruptura para diferentes carregamentos pré-imersão em escala linear, sem considerar os valores de  $C_{max}$ . (dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)).

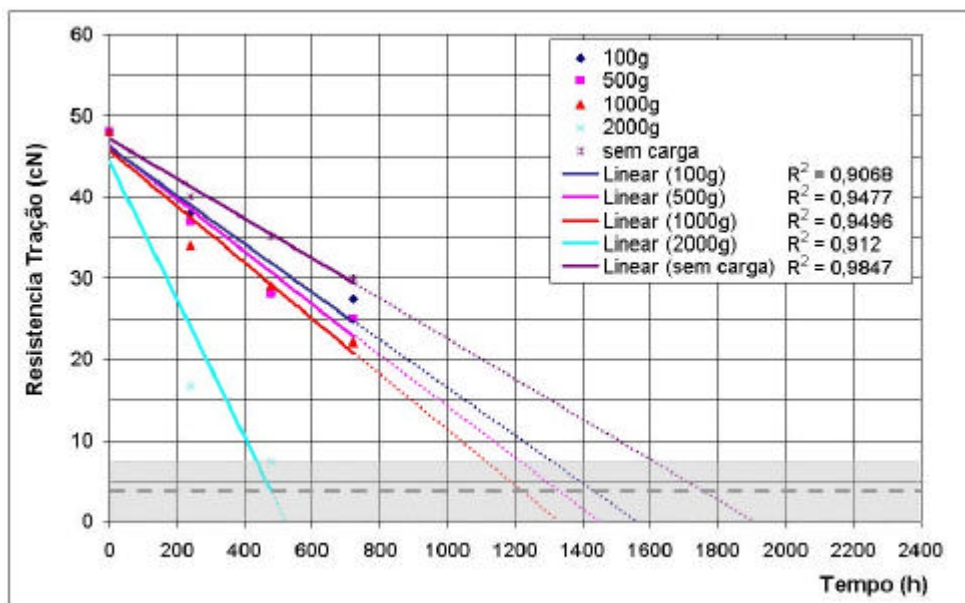


Figura 3.22 - Expectativa de ruptura para diferentes carregamentos pré-imersão em escala linear (dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004)).

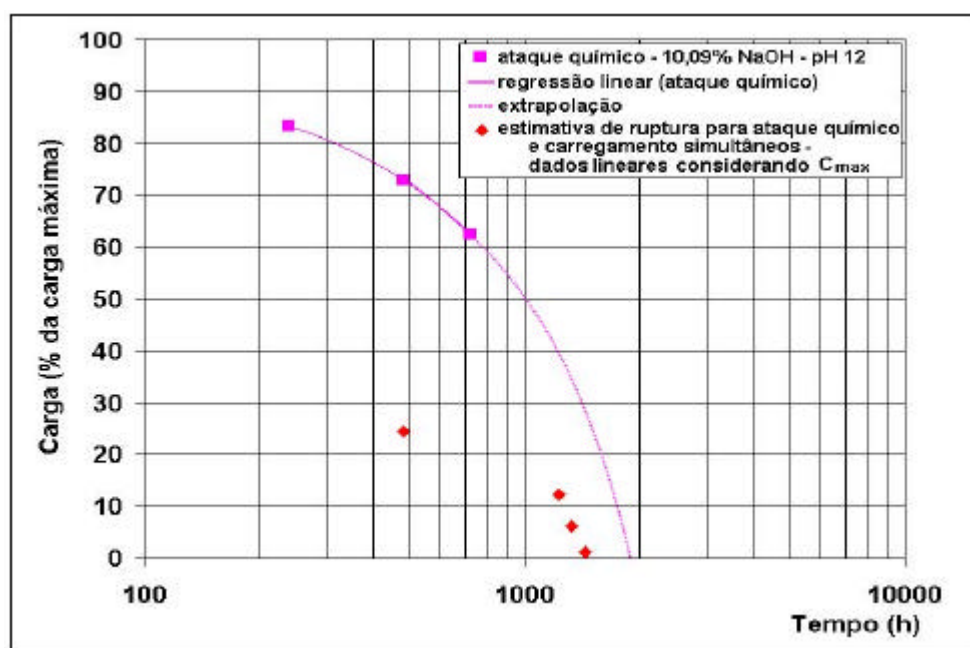
A partir da extrapolação das linhas de tendência referentes a cada carga, pôde-se conhecer o tempo da provável ruína dos filamentos. A justificativa da exclusão dos pontos de máxima carga em (a) e (b) está, em primeiro lugar, na característica da escala logarítmica, que não permite considerações em tempo zero ( $t = 0$ ) e, no caso de (b), para fins exclusivos de comparação e verificação do comportamento.

Foi estipulado um patamar de menor resistência dos corpos-de-prova. Esta consideração tomou por base os resultados dos ensaios em filamentos sob 2000g de carga, que apresentaram total degradação no período entre 20 e 30 dias. Na análise logarítmica (Figura 3.20), a extrapolação da regressão log-linear foi além das 720h, evidenciando uma zona de resistência à tração em níveis desprezíveis. A partir destas faixas de valores (em cinza, nos gráficos) estipularam-se retas médias, utilizadas então, como limites inferiores da resistência. Os valores obtidos neste processo estão expostos na Tabela 3.10 e, com base nesses dados, foi possível elaborar o gráfico da Figura 3.23. Foram utilizados apenas os valores advindos da análise linear (c) tido como de maior representatividade, apesar dos valores de  $R^2$  serem

ligeiramente inferiores. Há também, a título de comparação e melhor visualização dos efeitos, a tendência de resistência dos corpos-de-prova após ataque químico, exclusivamente.

*Tabela 3.10 – Valores dos tempos relativos às prováveis rupturas em função da carga aplicada pré-imersão para as três considerações de análises.*

CARGA		TEMPOS (h)		
(g)	(% Cmax)	(a)	(b)	(c)
2000	24,5	600	480	570
1000	12,3	4100	1230	1480
500	6,1	4100	1330	1550
100	1,2	5000	1440	1730



*Figura 3.23 – Consideração do efeito sinérgico entre o carregamento e hidrólise em fios de PET, imersos em solução de NaOH, com pH 12 à temperatura ambiente, utilizando dados de East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004).*



## **CAPÍTULO 4**

### **4. ESTUDO DA SINERGIA ENTRE OS $FR_{FL}$ E $FR_{MA}$ – ENSAIOS**

#### **4.1 Introdução**

Parte da proposta desse trabalho é uma análise inicial da sinergia entre os Fatores de Redução devido ao Meio Ambiente e Fluência baseada principalmente em resultados de experimentações em laboratório. Para isso, foram realizados ensaios de *Fluência convencional* (temperatura controlada e constante), *Fluência Associada* (corpos-de-prova submetidos à fluência, imersos em solução alcalina) e *Resistência à Tração Unidirecional não confinada*, sempre em filamentos contínuos de Poliéster (PET) e em caráter comparativo.

Optou-se pelo uso de filamentos, e não corpos-de-prova bidimensionais, principalmente pela aparente facilidade de manuseio e cargas requeridas para análise. Essa opção indicava ser uma forma de agilizar o desenvolvimento da pesquisa.

Os ensaios de *tração unidirecional não confinado* foram realizados nos Laboratórios de ensaios mecânicos do AMR-IAE e divididos em duas etapas: primeiramente com corpos-de-prova inalterados, para se obter parâmetros de resistência do filamento e, posteriormente, com corpos-de-prova previamente submetidos a agressões controladas por solução alcalina de elevado pH.

No caso dos ensaios de fluência, tanto o modelo convencional quanto o de fluência associada foram realizados no Laboratório de Geossintéticos do ITA com diferentes patamares de carga representados pela porcentagem do valor médio da resistência máxima de ruptura obtida em ensaio rápido (tração unidirecional não confinada)

Para o estudo da fluência associada foi desenvolvido um equipamento que permitiu submeter os corpos de prova à fluência e imersão em reagentes simultaneamente, com o mínimo de interferências externas, tanto químicas quanto mecânicas.

## 4.2 Seqüência de ensaios

O desenvolvimento deste estudo se baseou principalmente nos ensaios de tração unidirecional em corpos-de-prova não confinados e nas análises de ruptura por fluência.

Primeiramente, foi realizada uma bateria de ensaios de tração a fim de obter o valor médio da resistência máxima dos corpos-de-prova retirados da amostra ainda em seu estado natural de recebimento. Esse valor serviu de base para a determinação dos patamares de cargas utilizados nos ensaios de fluência subseqüentes.

Os primeiros ensaios realizados foram os de *fluência convencional*, onde os corpos-de-prova ficaram expostos apenas ao ar ambiente, porém com temperatura e umidade relativa do ar controladas. Inicialmente a tara utilizada foi correspondente a 80% da carga máxima de ruptura. Após diversos testes, pôde-se estabelecer um padrão de procedimento para o ensaio. As análises que seguiram utilizaram 85%, 90% e 75% da carga máxima de ruptura, consecutivamente e nos moldes do procedimento adotado.

Paralelamente, conjuntos de corpos-de-prova foram imersos em solução alcalina (pH 12) e após um tempo pré-determinado, retirados e lavados. Cada conjunto foi posteriormente ensaiado à tração para cálculo das perdas médias no valor da resistência devido às possíveis reações de hidrólise.

A última bateria de ensaios realizada foi a de *Fluência Associada*. Neste caso, os corpos-de-prova foram submetidos a cargas para análise da ruptura em fluência dentro de um recipiente contendo a mesma solução utilizada para ataques químicos. Assim foi possível observar a resposta destes fenômenos quando agindo em conjunto.

O organograma da Figura 4.1 ilustra todo o processo e seqüência de ensaios.

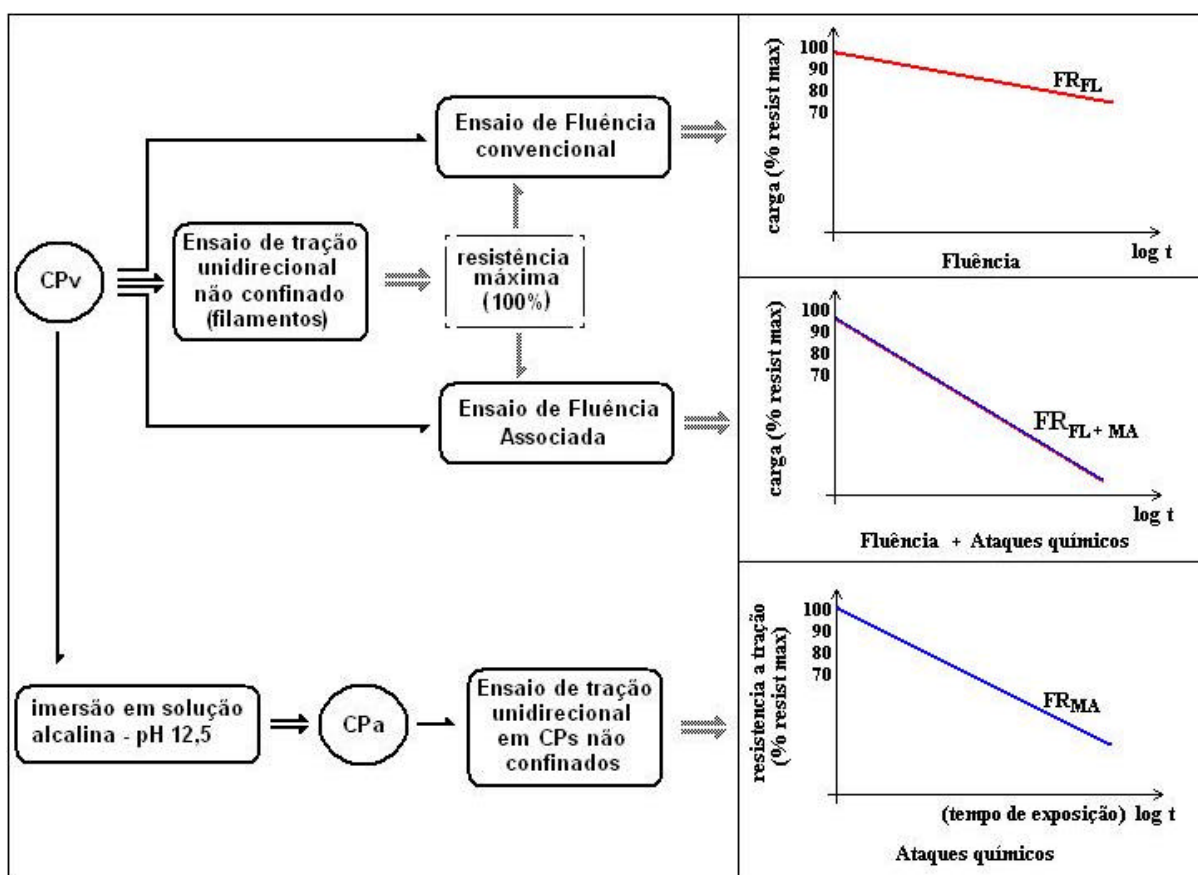


Figura 4.1 – Organograma ilustrativo da seqüência de ensaios adotada, onde  $CP_v$  e  $CP_a$  são os corpos-de-prova antes e após ataques químicos, respectivamente.

### 4.3 Ensaios de tração

#### 4.3.1 Análises preliminares

Em uma primeira etapa, foram utilizadas duas amostras de filamentos contínuos de PET, retiradas na fase pós-estiramento do processo de fabricação de geotêxteis, cedidas pela

OBER. Dessas amostras foram extraídos corpos-de-prova compostos por 50 fios cada e comprimento de aproximadamente 300mm. O passo seguinte foi submeter esses corpos-de-prova aos ensaios de tração.

Inicialmente, os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios universal INSTRON modelo 1030 onde o corpo-de-prova era preso ao equipamento nos sistemas de fixação pelas extremidades, sendo submetidos a esforços longitudinais, até a ruptura. A garra inferior, do tipo “mordedor”, se mostrou bastante eficaz no sentido de evitar o escorregamento, porém com risco de danificar os fios devido ao serrilhado existente em suas faces e também pelo próprio estrangulamento, que poderia gerar pontos de fraqueza. Isso foi solucionado colocando uma proteção com algumas camadas de papel em torno da área de contato fio-garra. Para outra extremidade foi preciso desenvolver um sistema de fixação específico, uma vez que o equipamento não dispunha de um sistema confiável e não permitia o uso de garra semelhante. O modelo adotado era basicamente composto por um cilindro metálico fixado diretamente no apoio da célula de carga, com um eixo circular onde o filamento pudesse ser enrolado. Neste caso o travamento ocorria pelo próprio atrito do conjunto. A Figura 4.2 é um desenho esquemático da garra utilizada, que se comportou de forma satisfatória, tendo sido observados poucos casos de ruptura devido às interferências do sistema ou mesmo escorregamentos.

Após algumas baterias de ensaios, mesmo variando métodos e procedimentos, os resultados apresentaram um coeficiente de variação da ordem de 10 - 15%, que foi, por fim, associada à não homogeneidade dos fios e à dificuldade na separação e contagem dos mesmos. A solução adotada neste caso foi a de desconsiderar os resultados e descartar a amostra.

A segunda tentativa foi com filamentos cedidos pela Huesker, utilizados para costura de geotêxteis. A amostra veio em uma bobina de multifilamentos contínuos de PP. A

preparação dos corpos-de-prova se resumiu ao corte em pedaços de 300mm aproximadamente. Dez corpos-de-prova foram ensaiados e, novamente, o que se observou foi uma elevada dispersão nos valores da resistência. Outro inconveniente foi o próprio valor da resistência final que, devido ao título da amostra (1000g/1000m), era muito superior ao utilizado no cálculo do equipamento de fluência associada, o que impossibilitaria posterior análise. A resistência final para os filamentos neste tipo de ensaio deveria ser inferior a 10N, mas o que se observou foram resistências da ordem de 30N.

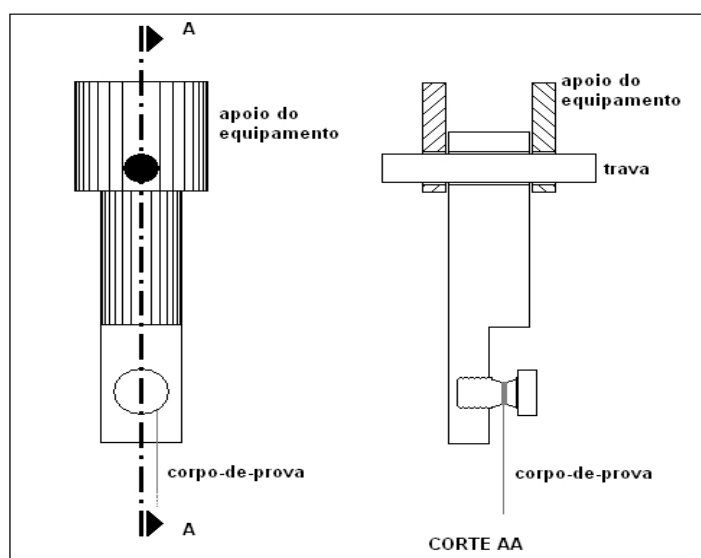


Figura 4.2 – Desenho esquemático e corte do modelo do sistema de fixação utilizado.

Em uma terceira tentativa, foi comprada uma bobina de filamentos têxteis de PET. Novamente, os resultados dos ensaios de tração apresentaram dispersões elevadas, fato prontamente associado à não continuidade dos fios. Como havia ainda a desconfiança desta mesma peculiaridade causar alterações na reposta dos ensaios de fluência, mais uma vez a amostra foi descartada.

As últimas análises foram feitas com corpos-de-prova extraídos de bobinas comerciais de filamentos contínuos de PET, também utilizados na indústria têxtil. Foram escolhidas três

marcas diferentes para que pudesse ser feito um levantamento estatístico dos resultados, como última opção. Porém, durante a bateria de ensaios de tração foi levantada a questão da célula de carga. Apesar de ser um equipamento muito utilizado para ensaios com fios, a célula de carga que estava instalada era uma 5kN. Mesmo sendo a célula mais sensível disponível para o modelo, representava um fundo de escala da ordem de 1000 vezes superior ao indicado para esse estudo, mas ainda assim adequada aos ensaios rotineiros daquele laboratório. Foi necessário, então, recorrer à outra INSTRON, mais antiga, porém com a possibilidade de se trabalhar com uma célula de carga de 20N e opção de ajuste do fundo de escala para 10N. Um novo sistema de fixação foi desenvolvido, baseado no modelo anterior, com dimensões apropriadas ao novo equipamento. Foram feitas algumas modificações no projeto que eliminaram as excentricidades e garantiram melhores resultados.

Após a mudança de máquina, juntamente com a célula de carga e o sistema de fixação, os resultados dos ensaios de tração apresentaram dispersões consideradas boas para tal análise.

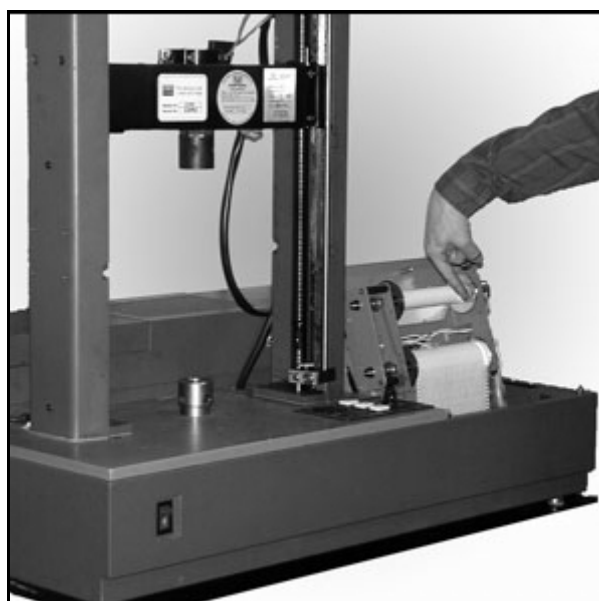
O modelo de procedimento adotado como padrão para os ensaios, desde os ajustes no equipamento, fixação dos corpos-de-prova e execução são apresentados no item 4.3.5.

#### **4.3.2 Equipamento utilizado**

A máquina de ensaios utilizada foi uma INSTRON, modelo 1131 do laboratório de análises mecânicas do IAE / AMR, idêntica a da Figura 4.3, com a célula de carga de 20N. A velocidade de deformação máxima do modelo é de 25mm/min, valor este, adotado em todos os ensaios. Como havia a possibilidade de controlar a velocidade de andamento do papel milimetrado, optou-se por uma taxa de 50mm/min, facilitando a leitura dos resultados. As regulagens são feitas através da alteração de pares de engrenagens existentes no mecanismo interno do equipamento.

Antes de cada bateria de ensaios, era feita a correção do fundo de escala, reduzindo-o para 10N. Em seguida, o “zero” do sistema de leituras e do papel milimetrado, alinhados e utilizando uma carga padronizada de 4N, feito o acerto “fino” de leitura ou calibração com carga.

O sistema de fixação superior foi desenvolvido baseado no utilizado durante os primeiros ensaios, antes de se optar pela troca de equipamento. Houve a atenção em eliminar excentricidades, para garantir melhores resultados. A garra inferior, do tipo mordedor, faz parte do conjunto de acessórios do próprio equipamento. Na Figura 4.4 os dois sistemas estão ilustrados.



*Figura 4.3 – Máquina de ensaios utilizada - Instron 1131.*

### **4.3.3 Corpos-de-prova “virgens”**

Os corpos-de-prova utilizados nesta pesquisa foram cortes de multifilamentos 100% PET extraídos de bobinas comerciais, comumente utilizadas na indústria têxtil. Os fatores determinantes para a escolha deste tipo específico de filamentos foram, entre outros: a

composição, o valor da resistência a tração, facilidade de uso e homogeneidade ao longo do fio.

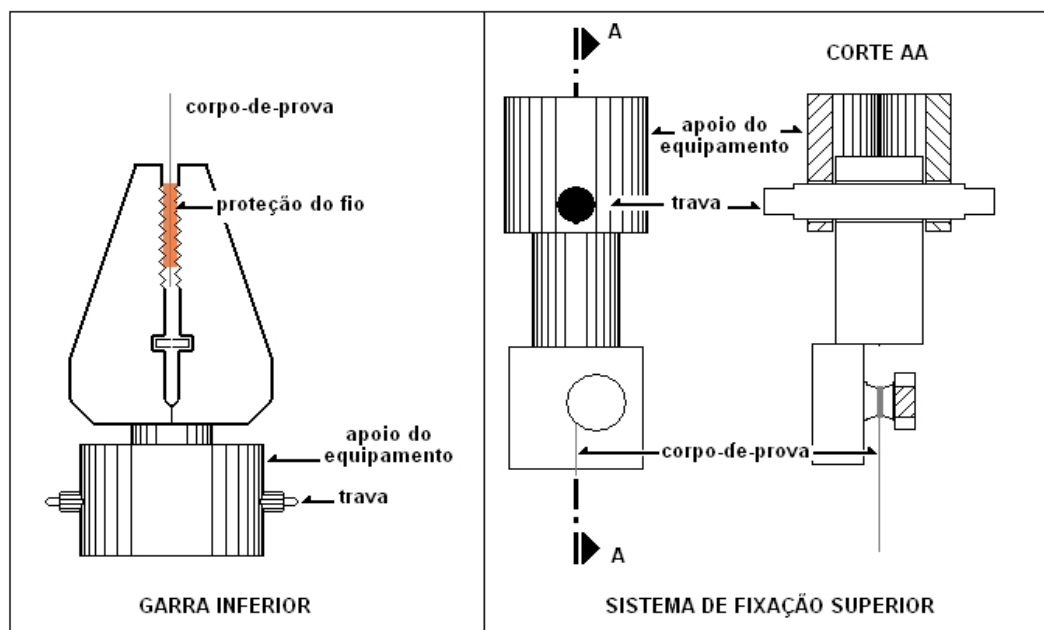


Figura 4.4 – Sistemas de fixação inferior e superior utilizados nos ensaios de tração.

Todos os corpos-de-prova foram extraídos de uma mesma bobina, cedida pela Polyenka. Em visita a essa fábrica, pôde ser observado um rígido controle industrial e a utilização de matéria prima sem adição de reciclados.

O fabricante forneceu, em laudo, os valores do título, resistência à tração e alongamento na ruptura, que podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados dos filamentos utilizados, segundo o fabricante.

ítems	unidade	média	Desvio padrão
Título	dTex [g/1000m]	184,70	-
Resistência	cN/dTex	3,55	0,10
Alongamento	%	23,37	0,76

Os corpos-de-prova em seu estado natural de fabricação são aqui chamados de “virgens” (CPv) e após imersão em solução alcalina, referidos como “alterados” (CPa). Em



ambos os casos, retirados de um mesmo lote e acondicionados em iguais condições de temperatura, umidade e luminosidade.

De acordo com a ASTM D 2256 (2002), que fixa os procedimentos de ensaio em tração para conjunto de filamentos contínuos, a distância entre garras no início do ensaio deve ser de  $250 \pm 3\text{mm}$  ou  $500 \pm 5\text{mm}$ . A norma que trata deste mesmo tipo de ensaio, porém para fibras têxteis, a ASTM D3822 (2001), recomenda uma distância mínima de 10mm e, quando possível, 250mm ou mais. Já a norma para ensaios em tração com geossintéticos, a NBR 12824/1993 sugere que o espaçamento seja de 100mm entre garras. Ou seja, a dimensão ideal varia de acordo com os objetivos da pesquisa e equipamentos e tipos de corpos-de-prova utilizados. A obrigatoriedade está na utilização de um mesmo padrão para todos os corpos-de-prova, independente do ensaio realizado.

Nesta pesquisa, o fator determinante para definir a maior dimensão dos corpos-de-prova foi a altura da caixa de ensaios de fluência com imersão. Nela, o espaçamento máximo de leitura é de 145mm e desta forma, foi adotado para todos os ensaios o valor de  $140 \pm 2\text{mm}$  como dimensão efetiva padrão. Porém, para garantir uma ideal fixação nas garras, tanto nos ensaios de tração como nos de fluência, os corpos-de-prova foram cortados com aproximadamente  $300 \pm 10\text{mm}$  e, durante a preparação dos ensaios, ajustados para que o comprimento efetivo desejado.

#### **4.3.4 Corpos-de-prova Alterados (CPa)**

A simulação de degradação devido ao meio ambiente foi feita através da imersão dos corpos-de-prova em solução fortemente alcalina (pH 12) de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , preparada a partir da diluição em água de óxido de cálcio (CaO) (composição na Tabela 4.2). O procedimento para obtenção da solução seguiu a indicação de Morita & Assumpção (1972). Para cada litro de solução, 5g do composto foram previamente hidratados em 20ml de  $\text{H}_2\text{O}$  para só então,

completar o restante. A razão de solubilidade do CaO em água descrita na literatura varia entre 1,4 g.l<sup>-1</sup> e 2 g.l<sup>-1</sup> (Bassett et al, 1981; Lee, 1996; Morita & Assumpção, 1972). Isso explica a necessidade encontrada de se filtrar a solução antes do uso.

*Tabela 4.2 – Composição química do CaO P.A. (Vetec Química Fina LTDA)*

<i>Análise</i>	<i>Teor</i>
Perda ao Fogo (PF)	Max. 3,00 %
Insolúvel em HCl	Max. 0,50%
Teor	Min. 95,0%
Cloreto (Cl)	Max. 0,05%
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Max. 0,50%

Inicialmente, foram utilizados cerca de 2 litros de solução divididos em 12 frascos com aproximadamente 150ml cada. Foi elaborado um plano de ensaios para determinar o horário em que os conjuntos de corpos-de-prova deveriam ser imersos em cada frasco para que a retirada e lavagem fosse feita com pelo menos 12h de antecedência aos ensaios e assim garantir uma completa secagem. Cada frasco foi tampado, numerado, etiquetado, acondicionado a uma temperatura de 32°C e agitados em intervalos regulares que variavam de acordo com o tempo de imersão previsto para cada conjunto.

Com o decorrer da pesquisa, foi inserido um novo procedimento neste processo de preparação dos corpos-de-prova. Os primeiros resultados evidenciaram baixos índices de ataque químico, uma vez que as respostas dos ensaios de tração diferiram significativamente dos estimados, com base na literatura consultada.

Durante a confecção, os fabricantes utilizam produtos para lubrificação dos fios com a finalidade de proteção contra danos mecânicos devido ao atrito, principalmente nas fases de estiramento e bobinamento. Para retirada desta camada, optou-se pelo uso de detergente

neutro e água pura, à temperatura que variou entre 35-40°C. Os corpos-de-prova foram lavados por cerca de 25 minutos, enxaguados e colocados para secagem.

O processo de lavagem foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu em esfregar cuidadosamente todo o comprimento dos filamentos com a ponta dos dedos e detergente em abundância. Na segunda etapa, os corpos-de-prova foram colocados em um béquer com 500ml de água contendo 10ml de detergente. Inicialmente, tentou-se reproduzir o sistema mecânico de lavagem adotado por Rahman & Alfaro (2004), onde foi utilizada uma máquina rotativa com solução aquecida. Em substituição a este equipamento, optou-se por uma chapa com controle de temperatura e sistema de imã rotativo. Porém, mesmo sob baixas rotações, houve um embaraçamento dos fios e, por este motivo, o sistema precisou ser descartado. A solução adotada foi agitar manualmente todo o conjunto com movimentos circulares por aproximadamente 10 minutos. O enxágüe foi realizado nos moldes da segunda etapa, entretanto, utilizando água pura.

#### **4.3.5 Procedimento Adotado**

Os ensaios de tração foram realizados em duas etapas. Primeiramente para definir o valor médio de ruptura dos filamentos “virgens” sob carga rápida (CPv) e posteriormente, para uma mesma análise com corpos-de-prova previamente submetidos à imersão em solução alcalina (CPa).

Baseando-se nas normas ASTM D 3822 (2001), ASTM 2256 (2002) e a NBR 12824 (1993) e após diversos testes e subseqüentes ajustes foi possível estabelecer um procedimento padrão para os ensaios de tração.

Com o equipamento ajustado e calibrado, era feita a fixação de um dos corpos-de-prova, primeiramente pela extremidade superior, utilizando três voltas completas no eixo de apoio do sistema e em seguida na outra extremidade, que era então, presa à garra, sempre com duas

camadas de cartolina em cada face do mordedor, para proteção dos fios. A Figura 4.4 ilustra os sistemas de fixação utilizados.

Como a máquina de ensaios dispunha de retorno automático após a ruptura, apenas no primeiro ensaio de cada série foi necessário ajustar os 140mm adotados como espaçamento entre garras, medidos da extremidade da garra inferior até a metade do eixo de apoio do sistema de fixação superior.

Estando bem preso o corpo-de-prova, eram ligadas as chaves de ativação do sistema de plotagem dos resultados e, em seguida, a chave principal, dando início ao ensaio.

Após a ruptura, o ensaio era interrompido, o retorno acionado e as informações do pico de cada gráfico anotadas.

#### 4.3.6 Resultados preliminares

Os resultados dos ensaios de tração em CPv ( Tabela 4.3) serviram de balizamento para os ensaios de fluência e para um possível descarte de amostras no caso de cargas muito elevadas, não condizentes com o projeto do equipamento de fluência associada.

*Tabela 4.3 – Resumo dos resultados dos ensaios de tração em CPv.*

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{\text{inicial}}$ (mm) <sup>(1)</sup>	140	140	140	140	140	140	140	140	140
$a_{\text{máx}}$ (N) <sup>(2)</sup>	6,70	6,45	6,80	6,60	6,90	6,80	6,70	6,70	6,90
$L_{\text{carga máx}}$ (mm) <sup>(3)</sup>	182,0	178,0	180,5	176,0	182,5	182,5	183,0	182,5	183,0
$e_{\text{máx}}$ (%) <sup>(4)</sup>	30	27,1	28,9	25,7	30,4	30,4	30,7	30,4	30,7
$J_{\text{tg máx}}$ (N/mm) <sup>(5)</sup>	0,25	0,29	0,29	0,25	0,25	0,25	0,29	0,29	0,25
$J_{\text{sec-50\%}}$ (N/mm) <sup>(6)</sup>	0,12	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20	0,19	0,21	0,19

(1) Comprimento inicial entre garras

(2) Resistência à tração máxima – ruptura

(3) Comprimento final – momento da ruptura

(4) Deformação máxima dos corpos-de-prova

(5) Rigidez tangente máxima

(6) Rigidez secante a 50%

## 4.4 Ensaio de Fluência Convencional

### 4.4.1 Análises preliminares

Tendo em mãos os resultados da primeira bateria válida de ensaios em tração, foi possível estabelecer as porcentagens de cargas para as análises de fluência.

A base para a elaboração dos procedimentos utilizados ao longo desta pesquisa nos ensaios de fluência foram a ISO/EN 13431 (1999) e NBR Projeto 02:153.19-05 (1999), que prescrevem o método para determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência à tração não confinada de geossintéticos. Devido ao tipo e dimensões dos corpos-de-prova, às baixas cargas utilizadas dentre outros aspectos, algumas das recomendações contidas nesta norma foram revistas e adaptadas.

Os ensaios de fluência visaram a análise em ruptura, ou seja, foram anotados somente os tempos necessários para que os corpos-de-prova chegassem à ruína. Não houve preocupação com medidas de deformação e análises com cargas inferiores a 50% da carga máxima obtida em ensaio de tração rápido.

Para essas análises foi utilizada a ala climatizada do Laboratório de Geossintéticos do ITA, onde a temperatura permaneceu em  $32^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Logo no início da primeira seqüência de ensaios de *fluência convencional*, novas dificuldades foram encontradas. A primeira delas foi quanto à velocidade e modo de aplicação da carga que, de acordo com a ISO/EN 13431 (1999) e NBR Projeto 02:153.19-05 (1999), deveria ser feita em no máximo 1(um) minuto. Ficou nítido que essa velocidade de aplicação em filamentos de pequena seção, como neste caso, gerava uma carga dinâmica que impossibilitava a aplicação de carregamentos superiores a 80% da carga máxima (obtida nos ensaios de tração). Foram realizados diversos testes e, quando não ocorria uma ruptura quase que instantânea, as variações nos tempos não seguiam qualquer padrão estatístico. Até então, não estava sendo utilizado nenhum equipamento para controlar a velocidade de aplicação da

carga. Simplesmente se soltava levemente o peso com as mãos em aproximadamente 1 min. O que pôde ser observado é que as pequenas e inevitáveis variações nesta taxa de aplicação implicavam em grandes variações no tempo de ruptura. Os resultados gerados não convergiram em nenhum momento.

A primeira providência adotada foi mudar o sistema de aplicação de cargas. Optou-se por um sistema onde todos os pesos ficavam apoiados em um patamar que, por meio de rosca, se deslocava para baixo, transferindo a carga dos pesos para os corpos-de-prova de forma simultânea e progressiva (Figura 4.5).

Mesmo assim, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Por mais lubrificado que o sistema estivesse e mesmo guardando o devido cuidado, vibrações prejudiciais ainda respondiam por pequenos solavancos nos corpos-de-prova. A alternativa encontrada foi a de utilizar um macaco hidráulico em regime de descida, para garantir uma transferência da carga mais suave e controlada. O princípio do patamar com os pesos permaneceu o mesmo. Após alguns testes com resultados satisfatórios, esse processo foi adotado como padrão para todos os ensaios desta natureza e está descrito em detalhes adiante, no item 4.4.5.

Ainda nesta primeira fase de testes, o ensaio revelou outros problemas. O primeiro relativo aos corpos-de-prova que, sob a forma de filamentos, permitiam que as cargas entrassem em giro, gerando vibrações e torque, principalmente no início do ensaio. Este fenômeno só cessava quando os fios estavam perfeitamente alinhados e sem momento suficiente para gerar novo giro. Alguns corpos-de-prova chegaram a esse estado, e então foi possível observar outro inconveniente, que só ocorria no momento da ruptura: uma seqüência de quebra progressiva dos fios. O fato dos corpos-de-prova serem compostos por dezenas de filamentos, possivelmente estava gerando uma tensão não uniforme em cada fio e, a partir da ruptura dos primeiros, seja por pontos de fraqueza, seja pela própria natureza do ensaio, a

carga por eles suportada era transferida aos outros de forma abrupta levando a um efeito “cascata” que culminava na ruptura total do corpo-de-prova.

Uma maneira simples de solucionar isso foi provocar uma torção nos corpos-de-prova e impedir seu giro, fazendo os filamentos trabalharem como um cabo, através do atrito. Nos ensaios de fluência realizados em caráter de teste, essa técnica se mostrou eficiente. Foi realizada ainda, uma bateria de ensaios de tração rápida, para verificar se o processo de torção alteraria os resultados em comparação com os obtidos anteriormente. Nenhuma mudança significativa foi observada.

Para chegar ao procedimento final adotado para os ensaios de fluência convencional (item 4.4.5), ainda foram necessários três passos importantes: 1) padronizar o número de torções que cada filamento deveria ser submetido; 2) trocar o “varal” de apoios por um maior, para eliminar as vibrações geradas pelas rupturas e 3) elaborar um roteiro de aplicação de cargas por patamares, que reduziu sensivelmente os solavancos e possibilitou melhor deformação dos fios.

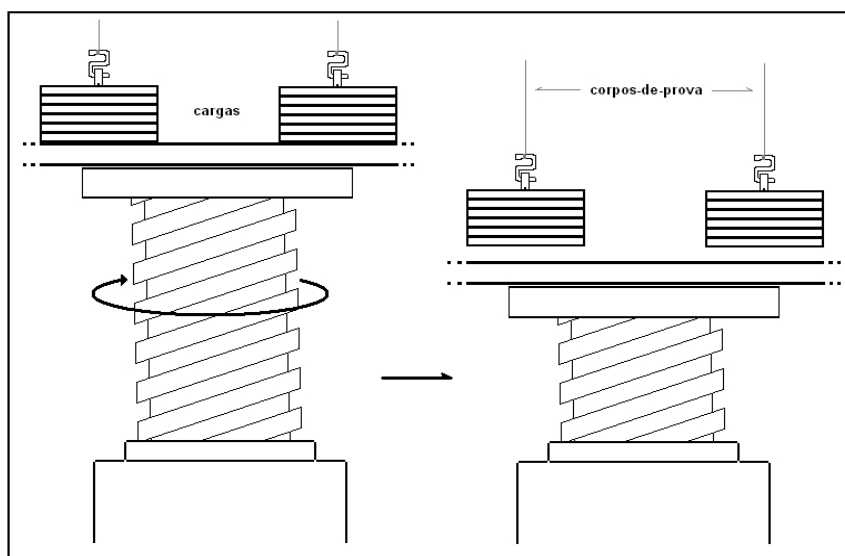
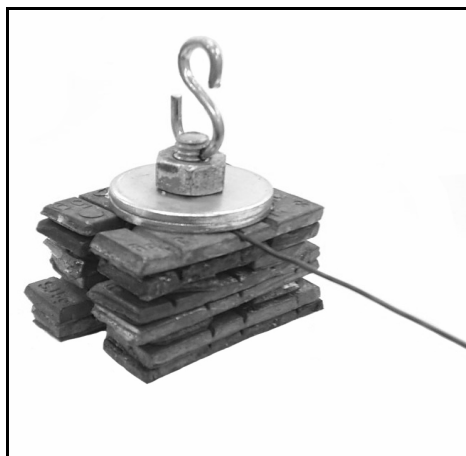


Figura 4.5 – Sistema de aplicação de cargas por meio de deslocamento com rosca.

#### 4.4.2 As Cargas

As cargas foram montadas com pequenos pedaços de chumbo presos a um parafuso, por meio de arruelas metálicas e porca, como pode ser visto na Figura 4.6. Uma das vantagens deste sistema foi a possibilidade de variar as taras com precisão, de acordo com a necessidade de cada etapa dos ensaios. Optou-se pelo chumbo devido, principalmente, à sua alta densidade e conseqüentemente, menores dimensões para uma mesma carga quando comparado a outros materiais.

O valor das cargas necessárias para cada etapa foi definido em função dos resultados dos ensaios de tração nos CPv. A Tabela 4.4 mostra o resumo dessas informações, com os valores das massas referentes às porcentagens da carga máxima de ruptura em ensaio rápido. O intervalo de valores é correspondente a uma vez o valor do coeficiente de variação (CV) do ensaio de tração, que neste caso foi igual a 2,79%, tanto para mais como para menos do valor médio.



*Figura 4.6 – Foto do modelo de cargas utilizado.*

A ISO/EN 13431 (1999) e NBR Projeto 02:153.19-05 (1999), recomenda que para análises de ruptura, os valores utilizados estejam compreendidos entre 50% e 90% da carga



máxima. Neste caso, foram realizados ensaios para 3 (três) patamares de carga compreendidos entre 75% e 85%.

*Tabela 4.4 – Valores das cargas correspondentes às porcentagens da carga máxima de ruptura.*

Referência	Carga média (N)
100% (Máx. Ruptura)	6,73
90%	6,05
85%	5,72
80%	5,38
75%	5,05
70%	4,71

#### **4.4.3 Sistemas de leitura do tempo**

Ensaio de fluência demandam, em geral, períodos de tempo que podem variar de poucos segundos até meses de espera. No caso específico de análise em ruptura, onde a ruína do corpo-de-prova é obrigatória, mesmo uma boa estimativa pode significar diferenças de dezenas de horas. É necessário, portanto, utilizar dispositivos que indiquem o horário da ruptura caso ela ocorra na ausência do operador.

Diante desta necessidade, foi elaborado um sistema aparentemente simples, onde um relógio registrava o tempo de ensaio que cada corpo-de-prova levava desde o acionamento, logo após o carregamento até o desarme do sistema que só ocorria no momento da ruptura. O princípio adotado foi o de fechar o circuito de alimentação de cada relógio utilizando dois fios que, quando separados interrompiam a corrente resultando na parada dos ponteiros. A grosso modo, o efeito de separar os fios era o mesmo de retirar a pilha do relógio.

Por se tratar de relógios analógicos sem dispositivo de acúmulo de voltas (contadores de dias), foi necessário realizar leituras em intervalos inferiores a 12.

Neste caso, os relógios foram dispostos acima dos conjuntos ensaiados, porém com a extremidade de contato dos fios de desarme, abaixo, ao final das fendas do anteparo (Figura

4.7), sendo o “gatilho” responsável pelo desarme do sistema no momento da ruptura a própria barra metálica utilizada para evitar o giro da carga.

#### **4.4.4 Os Corpos-de-Prova**

Foram utilizados apenas corpos-de-prova virgens, seguindo o mesmo procedimento de preparação do item 4.3.3.

#### **4.4.5 O equipamento e procedimento adotado**

Os ensaios foram realizados em suportes de madeira contendo quatro apoios cada, espaçados de 20cm entre si, com rigidez e massa elevadas o suficiente para garantir isolamento entre os corpos-de-prova ensaiados. Como pode ser visto na Figura 4.7, cada apoio recebeu um conjunto de ensaio (corpo-de-prova, carga e ganchos) por vez juntamente com o sistema de leitura do tempo.

Cabe salientar que esse tipo de fixação, em suporte único, não é recomendado, mas alguns fatores levaram a opção por este procedimento:

- Necessidade de simplificar os equipamentos a serem desenvolvidos face ao tempo e amplitude da pesquisa;
- Análise com objetivo apenas qualificativo, buscando compreender os fenômenos;
- Grande diferença na massa dos fios carregados e do sistema de sustentação e,
- Em ensaios-teste e ao longo dos ensaios, não foram observadas rupturas subseqüentes dos corpos-de-prova, apesar da fragilidade e sensibilidade dos fios.

A Figura 4.8 ilustra a solução adotada para evitar o giro das cargas. Foram fixadas nas próprias cargas pequenas barras metálicas rígidas que traspassavam por fendas existentes no anteparo do suporte dos varais.

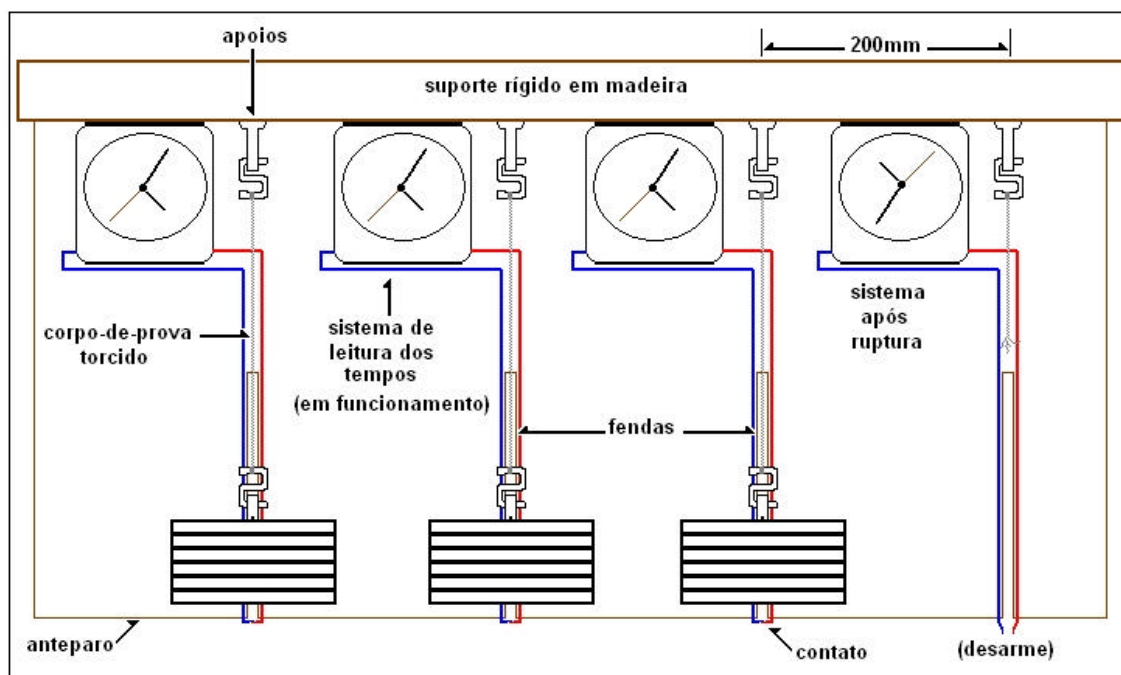


Figura 4.7 – Desenho esquemático do ensaio de fluência convencional com sistemas de leitura.

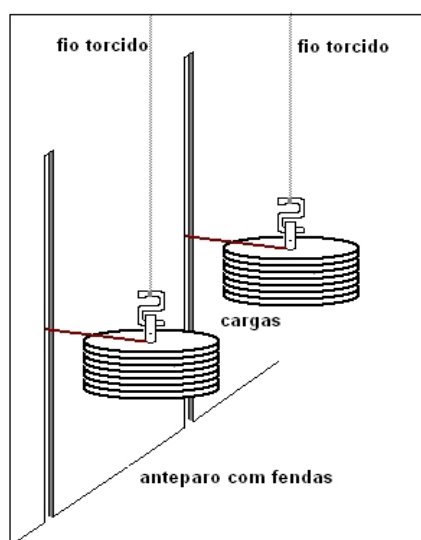


Figura 4.8 - Esquema adotado para bloqueio de giro nos ensaios de fluência.

O procedimento adotado como padrão para preparação e ensaio foi o de número 06 (seis), resultado de diversas tentativas e modificações nas seqüências e métodos utilizados

para preparação do ensaio, desde a fixação dos corpos-de-prova no sistema até o processo de aplicação das cargas.

A Figura 4.9 ilustra o primeiro estágio de preparação do carregamento, com as cargas já dispostas na altura inicial do ensaio (140mm) sobre um platô preso ao macaco hidráulico em sua extensão máxima de abertura, com o cuidado de manter o parafuso de controle do esvaziamento do macaco bem fechado.

Cada corpo-de-prova foi inicialmente fixado à carga correspondente, por meio de 10 voltas em torno da parte superior do gancho, atentando para a sobreposição da ponta livre a partir da quinta volta. O passo seguinte consistiu em prender a outra extremidade ao gancho superior, também com 10 voltas para fixação, porém, com 2 nós ao final para evitar que o filamento desenrolasse. Esse mesmo gancho serviu de apoio para que pudesse ser feita a torção dos fios, com 10 voltas completas em cada corpo-de-prova.

A fase de carregamento foi feita de forma que houvesse uma gradual transferência do peso das cargas para os corpos-de-prova. Inicialmente, as cargas ficaram totalmente apoiadas sobre um patamar preso ao macaco hidráulico. O procedimento de descida do patamar foi realizado sempre com vistas na régua presa ao fundo do sistema e com auxílio de um cronômetro. O parafuso de controle do macaco hidráulico era liberado vagarosamente e a descida realizada com uma velocidade próxima a 0,1mm/s. A cada 10mm de deformação o processo era interrompido por 1min. Neste intervalo anotavam-se os tempos do cronômetro, referentes ao início e final do intervalo. Todo o processo era novamente iniciado e repetido até que todas as cargas estivessem suspensas apenas pelos corpos-de-prova como ilustrado também na Figura 4.9.

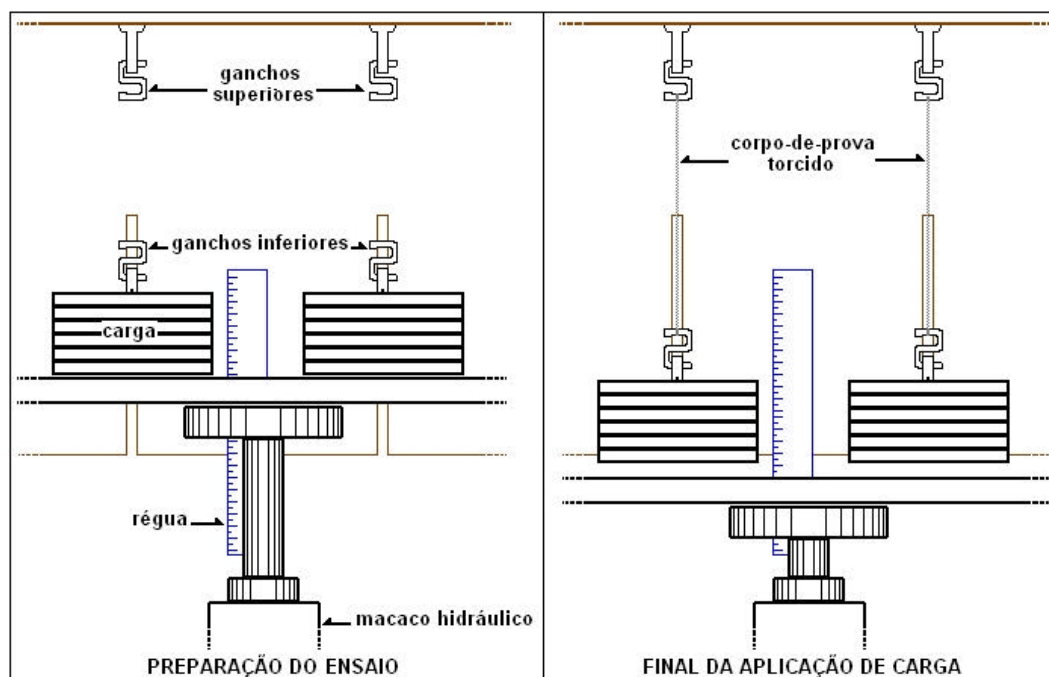


Figura 4.9 – Estágios inicial e final da etapa de preparação e carregamento dos corpos-de-prova no ensaio de fluência convencional.

## 4.5 Ensaio de Fluência Associada

### 4.5.1 Análises preliminares

O primeiro passo para que essa análise pudesse ser realizada foi o desenvolvimento do equipamento de ensaio. Havia a necessidade de criar um sistema onde os corpos-de-prova pudessem ser submetidos a um carregamento, para o desenvolvimento da fluência, porém imersos em um recipiente com uma solução química agressiva. Eram imprescindíveis ainda, uma mínima interferência externa possível, tanto química quanto mecânica, a possibilidade de acompanhamento das deformações (face frontal transparente), a facilidade de manuseio e uma análise precisa. Visando atender esses requisitos, a preocupação imediata foi com a disposição das cargas. Deixá-las imersas na solução poderia gerar reações químicas indesejadas, interferência no momento da ruptura, problemas devido ao empuxo e dificuldades para aplicação do carregamento. Optou-se por um sistema com dois eixos auxiliares que permitiram trabalhar com as cargas fora do recipiente de imersão, mas ainda atuando por

efeito da gravidade. Esse sistema está esquematizado na Figura 4.14, que foi base para construção do modelo final adotado. A concepção do sistema de cargas, modo de funcionamento e características gerais permaneceram os mesmos, desde esse primeiro projeto até a construção do modelo utilizado. Porém, neste intervalo, foram realizadas diversas modificações, principalmente no sentido de otimizar e padronizar o sistema de aplicação e transferência das cargas para os corpos-de-prova. Não havia sido levada em consideração a aplicação dos carregamentos com ajuda de um macaco hidráulico e não se estimou tamanha deformação dos corpos-de-prova como as observadas nos ensaios de fluência convencional. Logo nos primeiros testes ficou claro que o curso vertical disponível para as cargas era pequeno, podendo impedir a livre deformação e, conseqüentemente, causar um alívio de tensões nos corpos-de-prova. Em vista disso, foi feita uma estrutura de apoio que permitia livre deslocamento dessas cargas, independente da deformação. Houve problemas, também, com as perdas excessivas devido ao atrito entre os eixos e os mancais, que servem de apoio para o sistema de aplicação de carga. Estes últimos foram substituídos por rolamentos de precisão, o que reduziu drasticamente as perdas por atrito.

Outra preocupação foi referente aos materiais utilizados, que deveriam ser inertes quando em contato com as soluções e no caso da face frontal, obrigatoriamente, transparente. Neste aspecto, a escolha foi pelo polipropileno, polímero altamente resistente e inerte, parafusos em aço inoxidável e vidro para as paredes do recipiente, formando uma espécie de caixa ou “aquário”. Para facilitar a montagem e execução do ensaio, optou-se por um equipamento desmontável, composto por três partes: o recipiente para solução (“aquário”), a placa de fixação dos corpos de prova (apoio) e uma armação externa de madeira com os eixos do sistema de transferência de carga. O equipamento montado e em funcionamento pode ser observado na Figura 4.15

### 4.5.2 As Cargas

Os sistemas de pesos adotados foram os mesmos utilizados nos ensaios de fluência convencional, compostos por placas de chumbo presas a um parafuso (Figura 4.6).

Devido às perdas decorrentes do sistema de aplicação de cargas, foi necessário corrigir os valores das massas de cada grupo ensaiado. Foram traçadas retas de correlação entre a carga real aplicada aos corpos-de-prova e a carga necessária, considerando as perdas, para se chegar a tais valores.

A verificação da carga real foi feita com auxílio de uma balança e pesos de referência. Sobre a balança foram colocados aproximadamente 2kg de carga para então, zerá-la. Em cada medição, os pesos foram pendurados lentamente na outra extremidade do sistema para registro do alívio gerado na balança. Na Figura 4.10 é possível observar o esquema adotado.

Após quatro medidas em cada varal, foram montadas as retas de correção para as cargas com as respectivas equações e  $R^2$ . Cabe ressaltar que, em uma primeira análise, as pesagens foram realizadas à temperatura ambiente, o que gerou valores de perdas incompatíveis com os resultados obtidos nos ensaios a 32°C. Novas medições foram feitas, desta vez a 32°C e, como esperado, os resultados diferiram dos anteriores. A Figura 4.11 ilustra os resultados obtidos nesta segunda etapa de análises.

### 4.5.3 Os Corpos-de-Prova

Nesta fase, os corpos-de-prova inicialmente utilizados foram os virgens (CPv), descritos no item 4.3.3. Porém, em um segundo momento, foi necessário recorrer ao processo de lavagem, descrito no 4.3.4.

Para promover a quebra da tensão superficial dos fios, a placa de fixação, já com os corpos-de-prova presos, foi previamente imersa em uma vasilha contendo água destilada a

32°C e quantidade mínima de detergente (1 gota por litro), onde permaneceu por pelo menos 3h. A Figura 4.12 ilustra essa etapa de preparação.

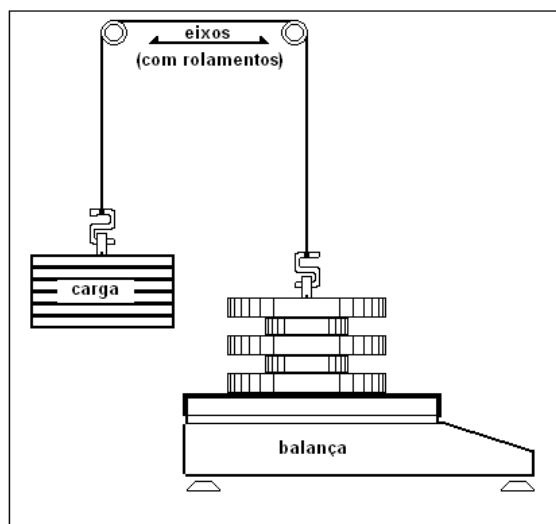


Figura 4.10 – Sistema para avaliação das perdas nos valores das cargas aplicadas.

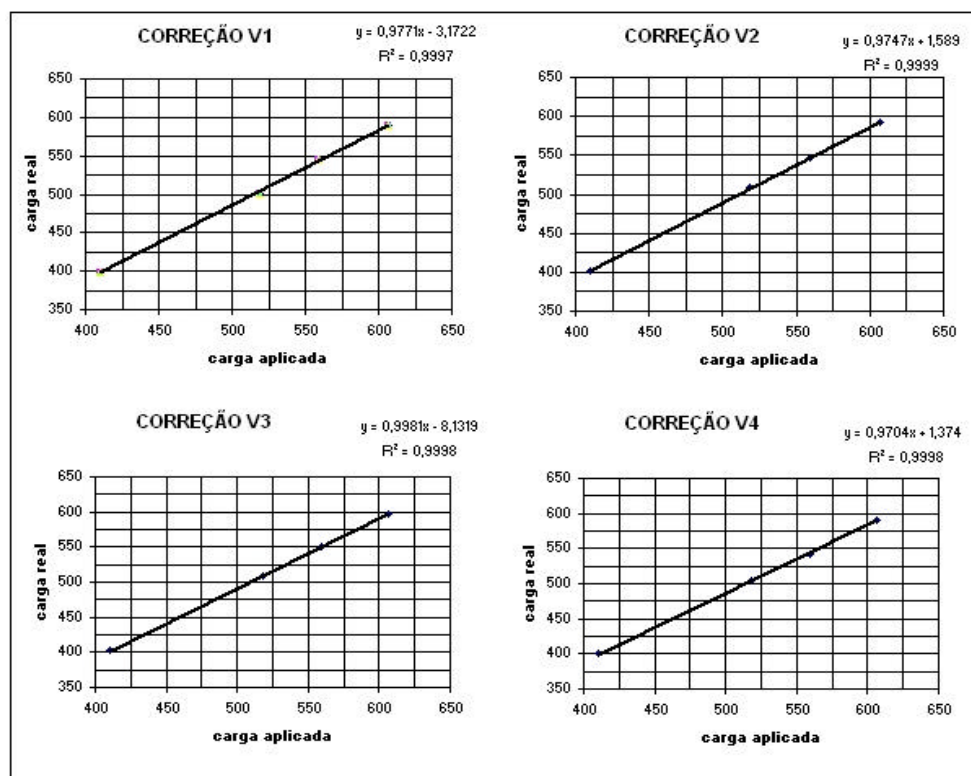


Figura 4.11 – Gráfico para correção dos valores entre as cargas reais e as cargas aplicadas.



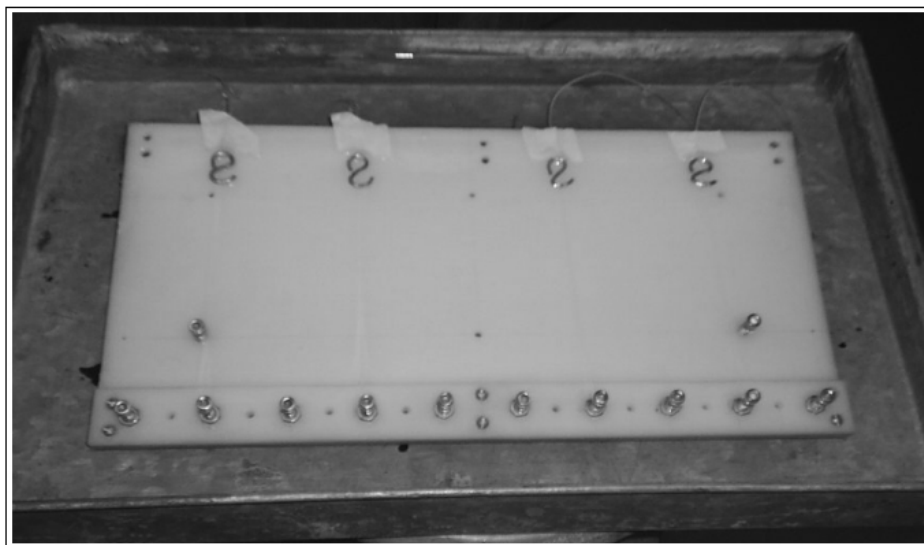


Figura 4.12 – Placa de fixação dos corpos-de-prova montada, em imersão pré-ensaio.

#### 4.5.4 Sistema de Leitura do Tempo

Nos ensaios de *fluência associada* o princípio e funcionamento dos sistemas de leitura do tempo eram semelhantes aos utilizados nos ensaios de fluência convencional, porém dispostos logo abaixo dos conjuntos ensaiados e o desarme provocado pela queda direta da carga sobre um dos fios (Figura 4.13).

#### 4.5.5 Equipamento / Procedimento adotado

A estrutura do equipamento final utilizado está demonstrada na Figura 4.14 onde é possível observar ainda, os apoios, a caixa de imersão com a solução, o posicionamento dos corpos-de-prova e o sistema de transferência de cargas por meio de eixos e fios de ligação. A placa de apoio para imersão foi confeccionada em polipropileno, com fixadores em aço inox parafusados em sua base, com possibilidade de ajuste e contendo um orifício para transpasse e melhor travamento da extremidade do corpo-de-prova. Visando trabalhos futuros com análises de deformação em fluência, foram fixados 6 parafusos (retirados durante esta análise), também em aço inoxidável, para servirem de referência em caso de análise das

deformações dos corpos-de-prova por foto. Esse método de leitura, utilizado por Baras (2001) em sua pesquisa, requer ao menos 4 pontos fixos de referência co-planares ao elemento analisado e com distâncias entre si conhecidas, formando assim um sistema de referência global. Desta forma, é possível mensurar distâncias entre quaisquer pontos dentro deste sistema. A caixa, ou aquário, montada em vidro, era travada contra o tombamento e movimentações pelo apoio externo, em madeira onde também eram fixados os eixos com rolamentos.

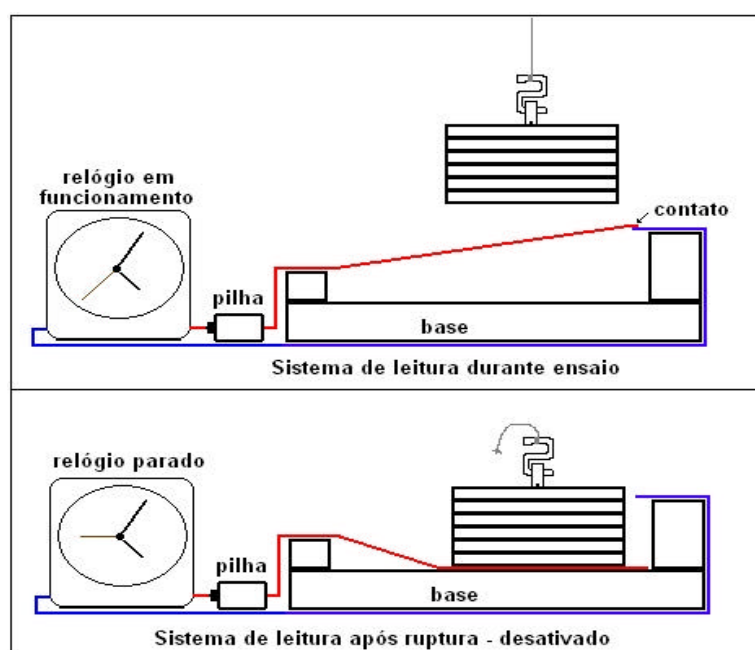


Figura 4.13 – Sistema de leitura dos tempos de ruptura - ensaios de fluência associada (vista lateral).

O equipamento final permite até quatro análises simultâneas. Na Figura 4.15 é possível observar uma das baterias de ensaios em andamento. Na ocasião da foto ainda estava sendo utilizado um sistema de bloqueio do giro dos corpos-de-prova. Porém, logo nos primeiros ensaios verificou-se que o mesmo era desnecessário, sendo eliminado dos ensaios subsequentes.

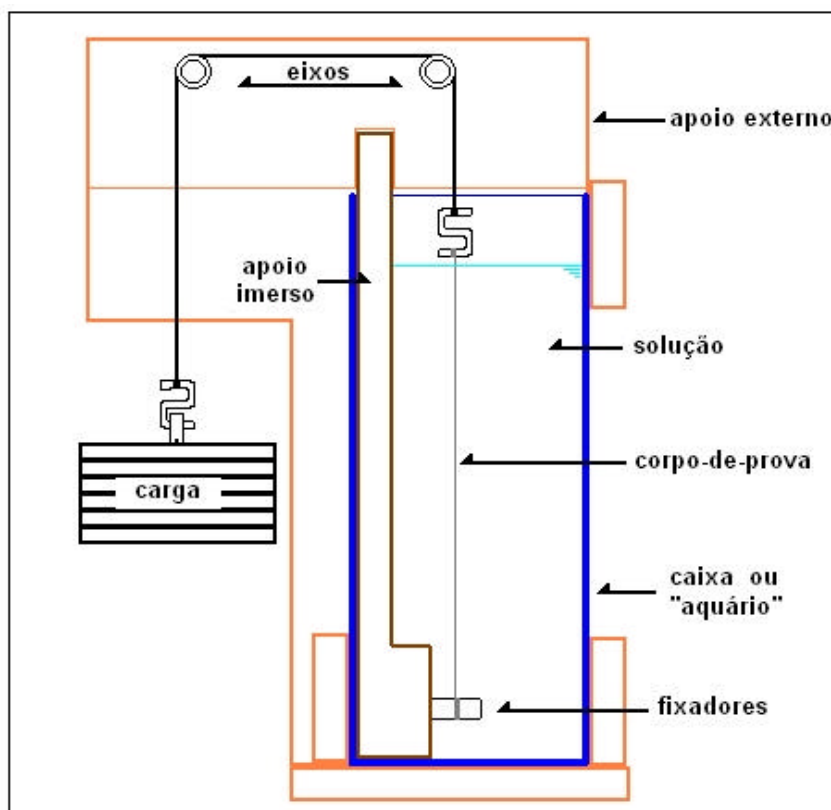


Figura 4.14 – Desenho esquemático do modelo de ensaio utilizado para análise da Fluência Associada (vista corte lateral).

O procedimento padrão de montagem, preparação e execução dos ensaios teve como base o utilizado nas análises de fluência convencional (*Procedimento nº 06*), com as modificações e adaptações pertinentes ao novo equipamento e ao processo de imersão.

Em cada bateria de ensaios, 4 corpos-de-prova eram submetidos à análise. No início da preparação, o equipamento precisava ser inteiramente desmontado para promover a fixação dos corpos-de-prova aos apoios da placa de imersão.

Cada corpo-de-prova era preso individualmente ao apoio correspondente na placa de imersão utilizando 10 voltas em torno do eixo. Este mesmo processo era adotado para a extremidade livre, presa ao gancho do “fio de ligação” (das cargas) com 10 voltas em torno de sua parte inferior e o travamento final feito com 2 nós (Figura 4.16). A placa, já com os

corpos-de-prova era, então, imersa em uma vasilha com água e detergente por pelo menos 3h antes da montagem final (Figura 4.12), na caixa de ensaio.

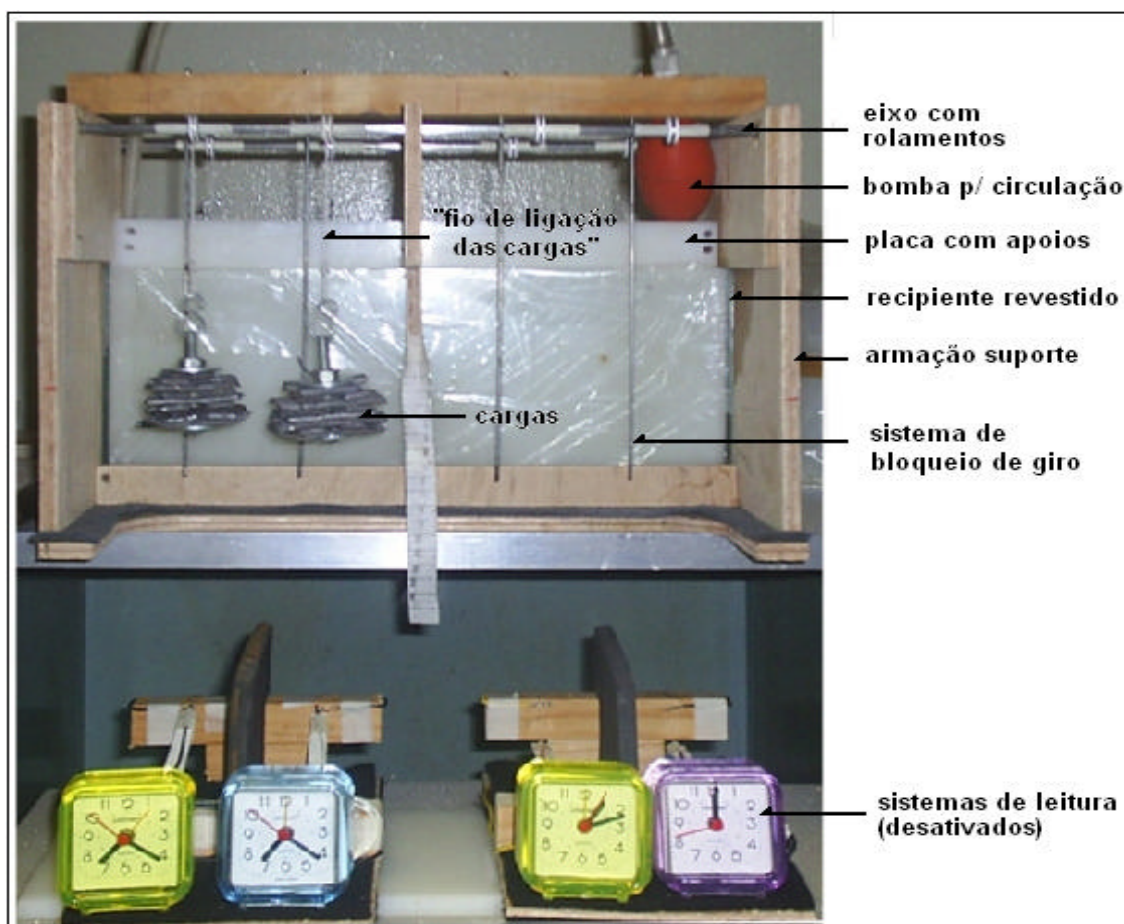


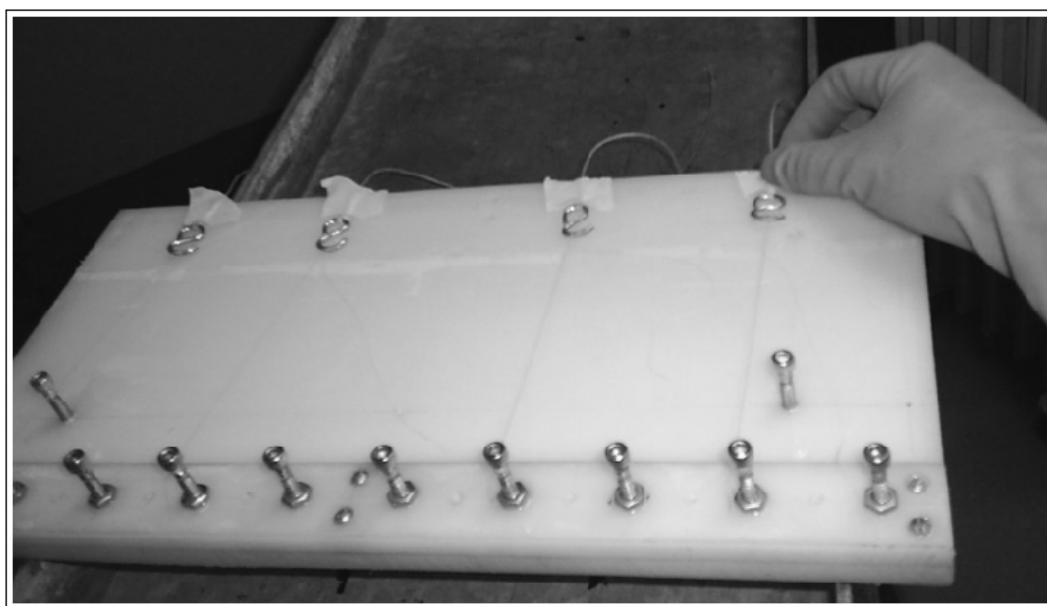
Figura 4.15 – Foto do ensaio de fluência associada em andamento e sistema de leitura dos tempos.

O platô do macaco com as cargas (ainda sem os cabos de ligação) era então, ajustado à altura apropriada ao início do carregamento e a solução química despejada no recipiente revestido para receber a placa com os corpos de prova. A solução de imersão foi a mesma utilizada para alteração dos CPa (item 4.3.4).

Com o cronômetro acionado, a placa era lentamente imersa na solução e ao final desta etapa, a estrutura de apoio rapidamente montada sobre o conjunto. Neste caso também foram previstas e realizadas as 10 torções nos fios, com a atenção de realizá-las segurando sempre

na extremidade superior dos corpos-de-prova, para padronizar (inclusive com o ensaio de fluência convencional) a quantidade de voltas por comprimento de cada elemento. Finalmente os “fios de apoio” podiam ser ligados às cargas e assim, dava-se início ao carregamento, realizado nos moldes do procedimento adotado nos ensaios de fluência convencional descritos no item 4.4.5.

Havia a preocupação de que os processos subseqüentes à imersão da placa fossem realizados de forma rápida para minimizar os tempos onde apenas o ataque químico estivesse ocorrendo. A decisão pela seqüência utilizada (imersão da placa com os corpos-de-prova – carregamento) foi tomada em função da pouca diferença observada nos resultados dos ensaios à tração em filamentos após imersão em reagentes para tempos de exposição inferiores à 5h.



*Figura 4.16 - Foto da fixação dos corpos-de-prova à placa de imersão.*

## **CAPÍTULO 5**

### **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

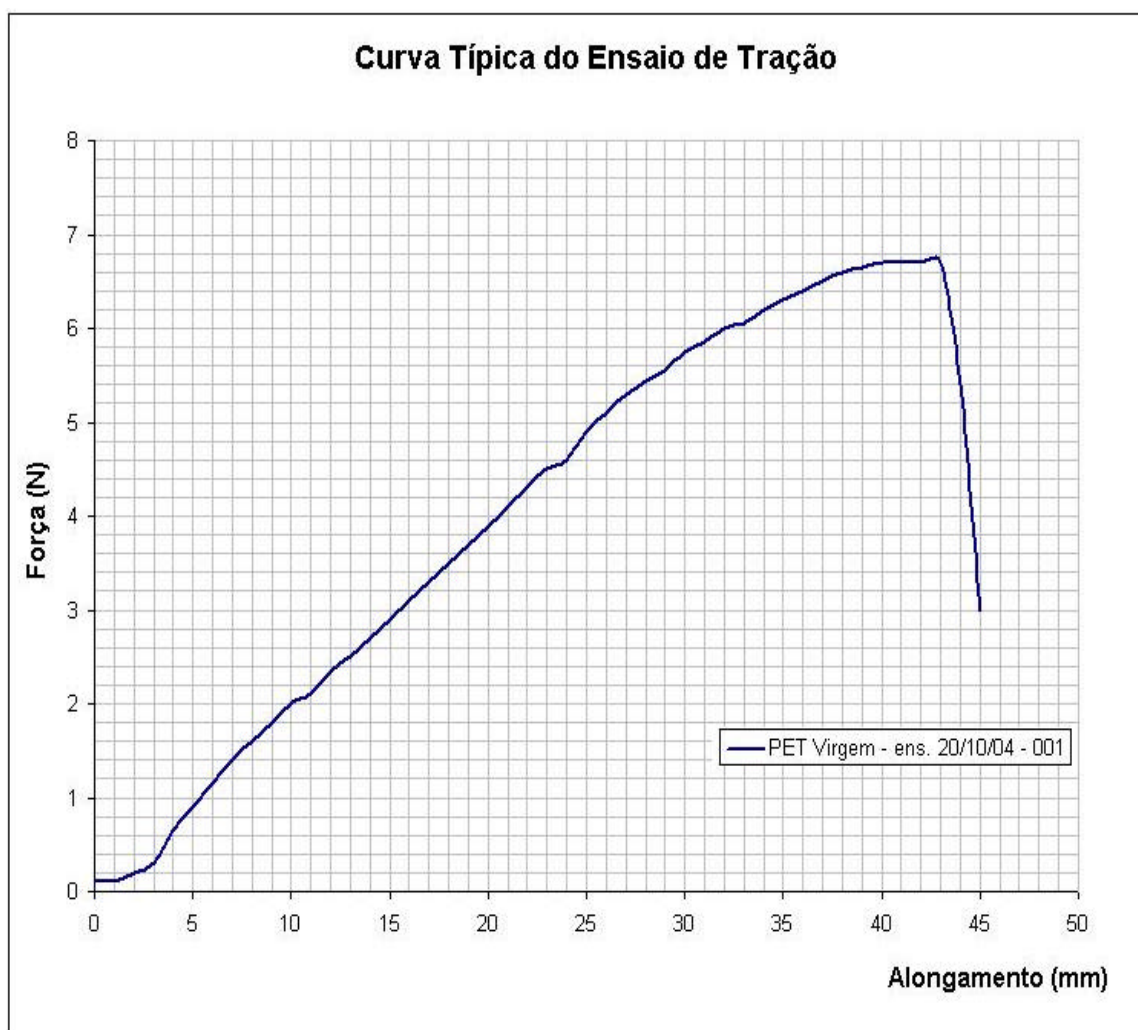
#### **5.1 Ensaio de tração**

Na máquina de ensaios utilizada – INSTRON 1131 – os resultados dos ensaios de tração longitudinal eram dados sob a forma de gráficos em papel milimetrado com o eixo das abscissas correspondente à deformação e o das ordenadas, à carga.

Para análise dos resultados, foi necessário corrigir o fator de escala dos gráficos. Como a velocidade do ensaio foi de 25mm/min e a do papel de 50mm/min, para as deformações essa razão foi de 2:1. No caso das cargas impostas, o fundo de escala corrigido para 10N no início dos ensaios permitia utilizar uma razão de 1:1. A Figura 5.1 ilustra uma curva típica dos ensaios de tração.

A Tabela 5.1 mostra os resultados da primeira bateria de ensaios, já utilizando os procedimentos e corpos-de-prova padrões descritos nos itens 4.3.3 e 4.3.5.

A partir dos resultados expressos na Tabela 5.1 foi possível conhecer os níveis de carga necessários aos ensaios de Fluência, calculados a partir do valor médio das cargas no instante da ruptura ( $a_{max}$ ) para os corpos-de-prova ensaiados. A Tabela 5.2 contém os valores, em gramas, referentes às porcentagens desta carga média, utilizando  $1N=101,97g$ .



*Figura 5.1 – Curva típica dos ensaios de tração.*

*Tabela 5.1 – Resistência à tração de filamentos virgens a velocidade de deformação de 25mm/min*

	mínimo	máximo	média	CV (%)
$a_{\max}$ (N)	6,4	6,9	6,7	2,14
$\Delta L$ (mm)	36	43	41,11	6,07
$e_{\text{rupt}}$ (%)	26	31	29,37	6,07
$J_{\text{tg max}}$ (N/mm)	0,25	0,29	0,27	7,08
$J_{\text{sec 50\%}}$ (N/mm)	0,12	0,21	0,19	14,43

Tabela 5.2 – Cargas, em gramas, referentes às porcentagens de  $a_{max}$ .

Referência	$a_{max}$	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
Carga (g)	686	652	618	583	549	515	480	446	412	377	343

Os ensaios de tração em filamentos previamente submetidos à agressão química, foram executados nos moldes dos ensaios em filamentos virgens. A Tabela 5.3 é um resumo dos resultados desses ensaios, considerando apenas a resistência à tração máxima em função do tempo de imersão para cada conjunto de corpos-de-prova. Neste caso, é válido considerar que somente houve perdas na resistência após 125h, uma vez que, para tempos inferiores, a porcentagem de perda apresentada foi menor que o próprio coeficiente de variação dos ensaios em corpos-de-prova virgens (2,14%).

A partir dos resultados dos ensaios de tração “pós-ataque” foi montado um gráfico do tipo *cargas de ruptura x tempo de imersão* (Figura 5.2). É possível observar uma leve queda na resistência dos filamentos, principalmente para tempos de imersão superiores a 125h. Porém, as perdas foram inferiores às expectativas, baseadas em estudos de outros autores (Melo 1990). Por se tratar de filamentos de PET com indicação para indústria têxtil e pequena resistência à tração, esperava-se que em períodos superiores a 100 horas, quando imersos e solução com pH 12, a degradação fosse maior. Esse fato foi, posteriormente, atribuído à elevada resistência superficial aos ataques, em virtude do processo de fabricação e da não lavagem dos filamentos anteriormente à imersão. Essa possível “proteção”, devido aos lubrificantes e outras substâncias utilizadas durante as diversas fases de tensionamento e bobinamento, funcionaria como uma barreira, em um primeiro momento, sendo “lavada” pelo próprio reagente, com o passar do tempo. Em vista disso, a postura adotada foi a de considerar a perdas efetivas apenas após 125h de imersão.



Tabela 5.3 – Cargas máximas na ruptura de corpos-de-prova submetidos a ataque químico.

CP	Carga (N) em função do tempo de imersão						
	30 min	1h	3h	125h	168h	213h	321h
01	6,6	6,7	6,7	6,7	6,3	6,3	6,2
02	6,6	6,7	6,9	6,5	6,6	6,4	6,2
03	6,5	6,5	6,4	6,4	6,5	6,5	6,4
04	6,5	6,7	6,4	6,8	6,6	6,6	6,5
05	6,6	6,8	6,8	6,6	6,7	6,4	6,3
06	6,6	6,3	7,1	6,4	6,0	6,4	6,3
07	6,8	-	-	6,7	6,6	5,8	6,3
<i>média</i>	<b>6,7</b>	<b>6,6</b>	<b>6,7</b>	<b>6,6</b>	<b>6,5</b>	<b>6,3</b>	<b>6,3</b>
<i>CV (%)</i>	<b>1,6</b>	<b>2,7</b>	<b>4,1</b>	<b>2,4</b>	<b>3,8</b>	<b>4,1</b>	<b>1,5</b>
<i>Perda (%)</i>	<b>2,1</b>	<b>1,8</b>	<b>0,2</b>	<b>2,1</b>	<b>3,7</b>	<b>5,7</b>	<b>6,1</b>

## 5.2 Fluência Convencional

Os resultados apresentados na Tabela 5.4 são referentes aos ensaios de fluência convencional, realizados de acordo com o procedimento descrito no item 4.4.5 e temperatura constante de  $32 \pm 2^\circ\text{C}$ .

As primeiras baterias de ensaios do tipo *fluência convencional* foram realizadas com 538g (78%) de carga, e os resultados utilizados para validação do procedimento, o que explica o maior número de corpos-de-prova neste nível de carregamento. Para as outras cargas, em princípio, foram utilizados 06 corpos-de-prova em cada análise, sendo descartados aqueles que se romperam a menos de 1cm dos fixadores ou na fase de carregamento. Precisaram ser também desprezados os resultados referentes ao apoio 01, devido a problemas construtivos. As análises utilizando cargas referentes a 88% da carga máxima romperam, em todos os casos, durante a fase de carregamento. Ainda assim, esses pontos foram considerados nos cálculos e inseridos nos resultados.

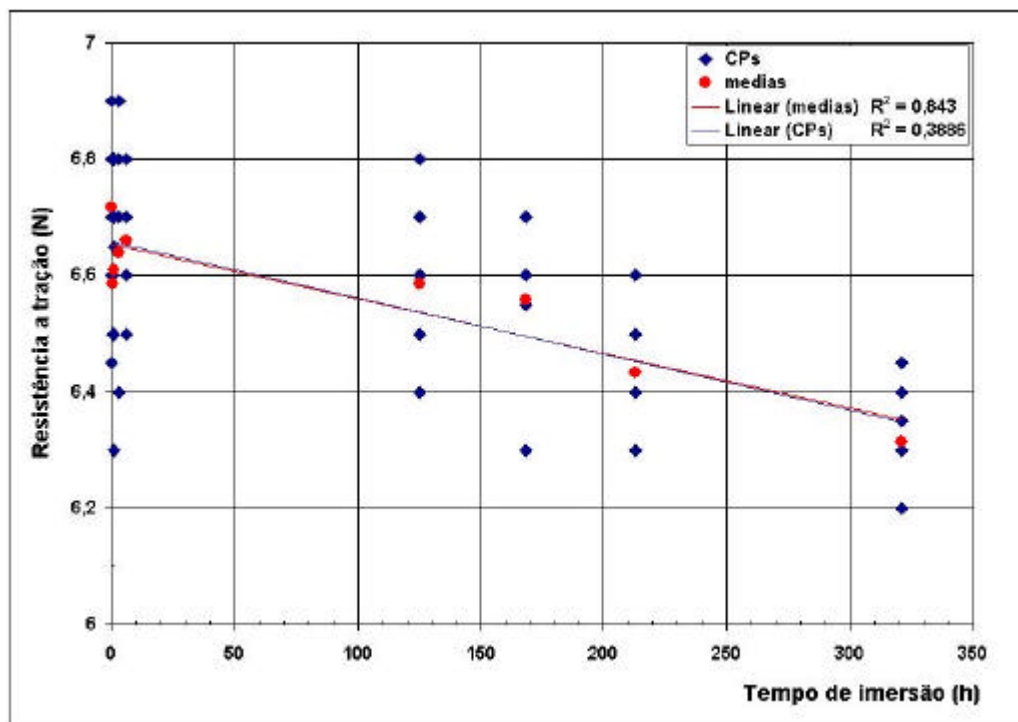


Figura 5.2 – Resistência à tração dos corpos-de-prova após imersão -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ; pH 12,32<sup>o</sup>C.

Tabela 5.4 – Tabela-resumo com os resultados dos ensaios de “fluência convencional”.

CP	Tempo até ruptura (h) em função da carga		
	74% (505g)	78% (538g)	83% (572g)
01	100	1,71	0,056
02	120	1,01	0,083
03	97	2,36	0,042
04	116	4,03	0,033
05	99	5,64	-
06	-	3,68	-
07	-	3,01	-
08	-	1,53	-
09	-	1,98	-

A Tabela 5.4 serviu de base para a elaboração do gráfico da Figura 5.3 onde é possível observar a relação entre a carga aplicada durante o ensaio e o tempo até a ruptura do corpo-de-prova, em escala logarítmica.

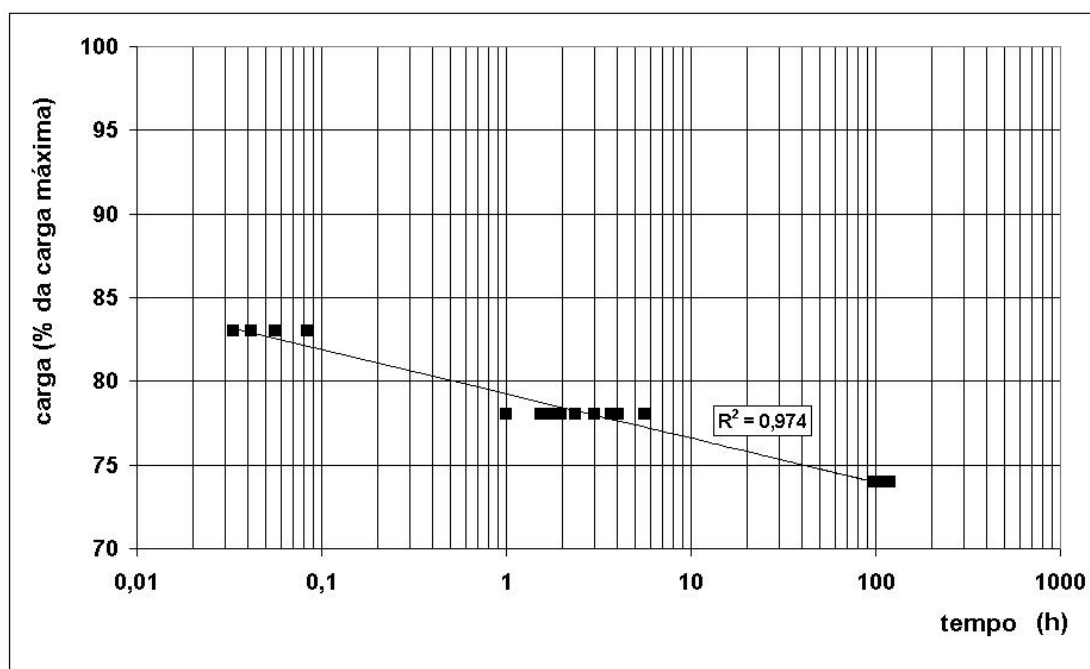


Figura 5.3 – Resultados das análises de fluência convencional.

### 5.3 Fluência Associada

Até se chegar ao procedimento padrão utilizado nesta pesquisa, foram necessárias aproximadamente 300 horas de ensaios, em cerca de 30 corpos-de-prova diferentes. Em princípio, a grande dispersão dos resultados, tanto entre si, como quando comparados com os valores estimados, alertavam para ineficiências e até mesmo, erros na concepção e execução do ensaio. Uma vez corrigidos os principais problemas, foi possível obter os tempos até a ruptura dos corpos-de-prova submetidos à fluência e hidrólise, simultaneamente, para diferentes níveis de carregamentos. Foram considerados válidos apenas aqueles pontos onde a ruptura do corpo-de-prova ocorreu a mais de 1cm dos pontos de fixação.

A Figura 5.4 contém o conjunto dos pontos válidos para o ensaio de *fluência associada*, a linha de tendência e o  $R^2$  resultante da regressão log-linear destes pontos. A título de ilustração e comparação, a linha de tendência foi extrapolada e os valores obtidos durante as baterias de ensaios de *fluência convencional* adicionados. Em ambos os casos, não foram considerados nos cálculos, os pontos referentes à carga máxima (100%).

O valor de  $R^2 = 0,8448$  indica que o ajuste a uma reta log-linear se mostrou satisfatório para o número de pontos utilizados. Porém, a quantidade limitada de valores não permite afirmar nada a respeito da extrapolação. É possível observar que os pontos resultantes das duas análises tendem a se distanciar e, a partir de 10 horas, há uma queda significativa no valor da resistência, provavelmente devido à influência da hidrólise.

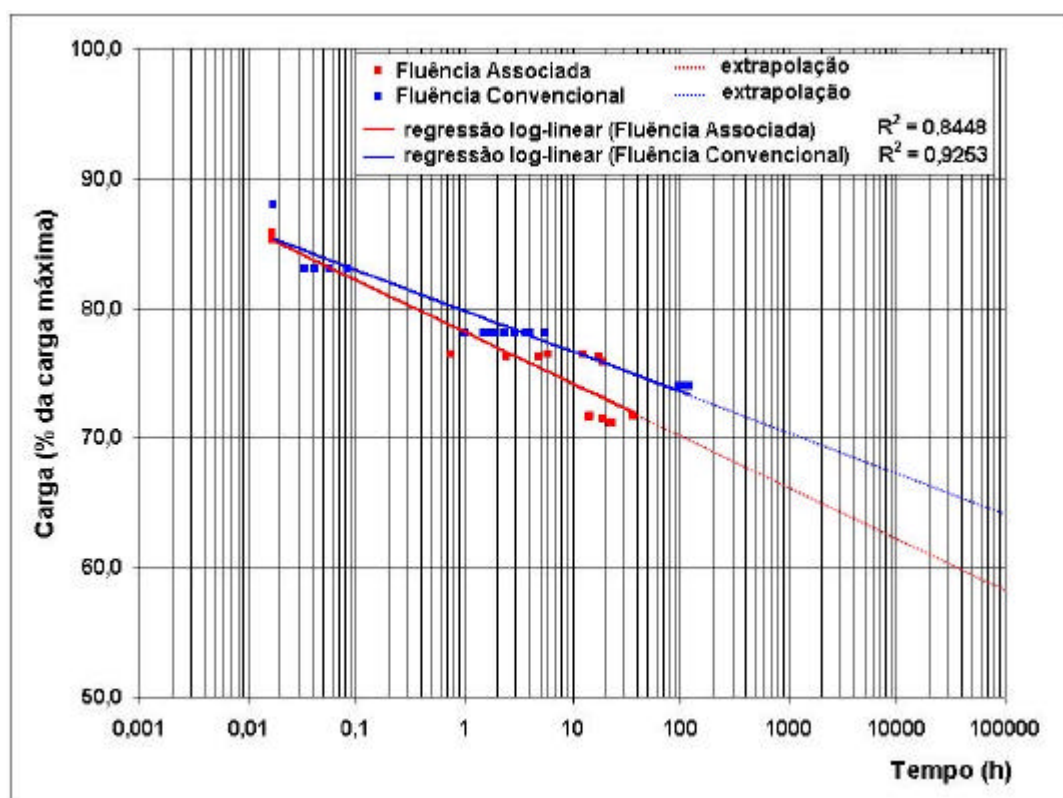


Figura 5.4 – Resultados dos ensaios de fluência convencional e associada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – pH 12).

#### 5.4 Estudo da sinergia

Inicialmente, a escala de tempo dos resultados dos ensaios de resistência à tração pós-hidrólise foi convertida para logarítmica (Figura 5.5). Isso permitiu uma comparação gráfica dos resultados, além de reforçar a idéia de um comportamento linear desses valores, devido à curvatura observada. Em seguida, foi feita a análise da sinergia, utilizando o conceito de fatores de redução, que toma por base a comparação das resistências à tração após degradação, em função da resistência a tração máxima, ou característica. Para facilitar as análises e permitir uma caracterização geral dos resultados, foi montado o gráfico da Figura 5.6 com as respostas dos três tipos de ensaios sobrepostas, em escala logarítmica. Neste caso, foram utilizadas regressões para todas as seqüências de valores, inclusive com boas estimativas de ajuste. Quatro valores foram tomados como referência (1h, 5h, 10h e 50h) e, a partir deles, calculados os fatores de redução. Os resultados destes cálculos estão apresentados na Tabela 5.5.

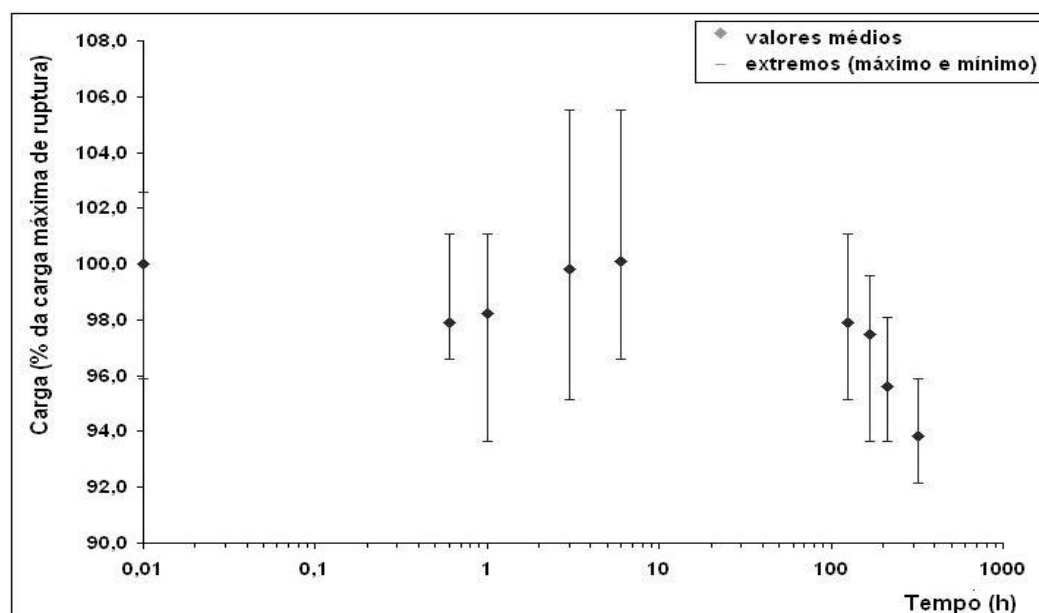


Figura 5.5 - Resistência à tração dos corpos-de-prova após imersão em solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  com pH 12 e temperatura de  $32^\circ\text{C}$ .

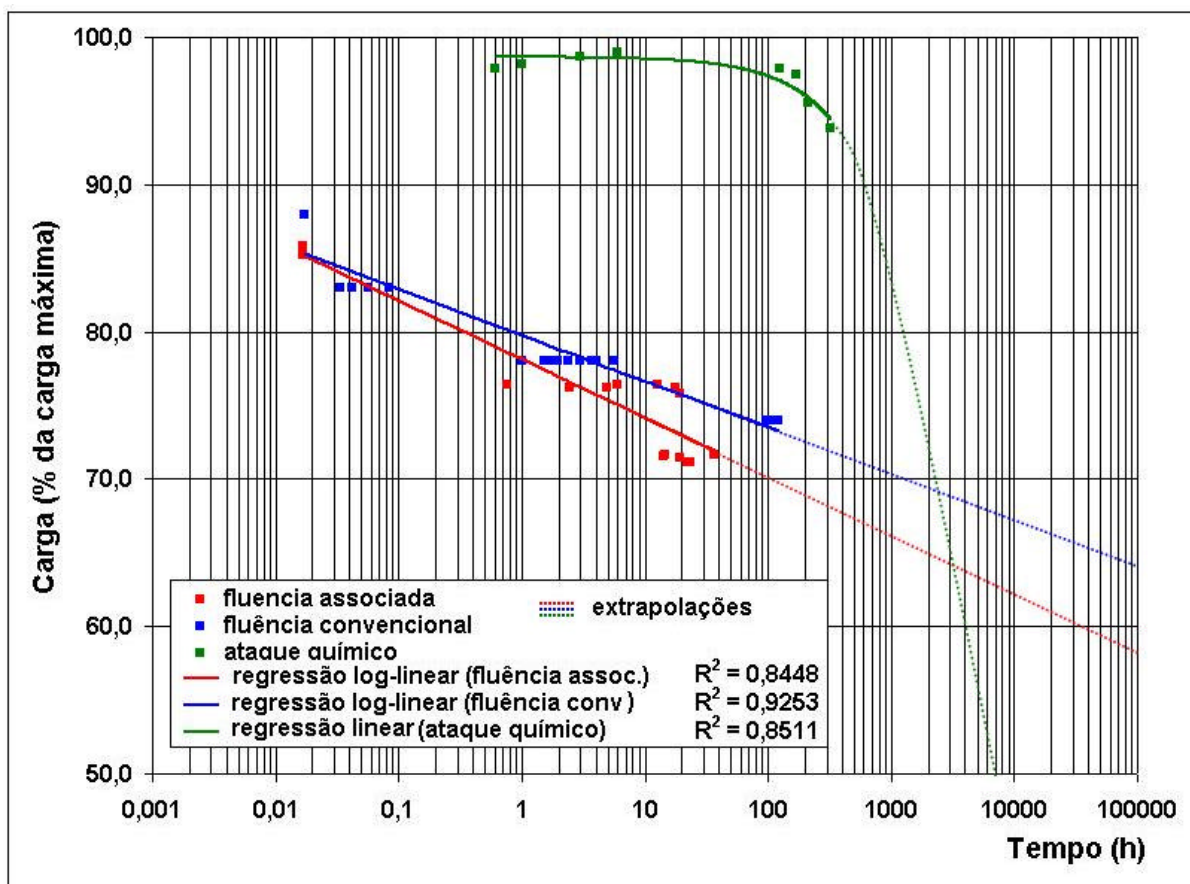


Figura 5.6 – Resultados dos ensaios de fluência convencional, fluência associada e resistência após hidrólise, em filamentos de PET.

Tabela 5.5 – Fatores de redução relativos à fluência, meio ambiente e efeitos conjugados.

	Carga		Carga		Carga		diferença	
	(%)	$FR_{MA}$	(%)	$FR_{FL}$	(%)	$FR_{FL+MA}$	$FR_{FL} \times FR_{MA}$	(%)
<b>1 h</b>	99,0	1,01	80,0	1,25	78,0	1,28	1,26	1,56
<b>5 h</b>	99,0	1,01	78,0	1,28	76,0	1,31	1,29	1,31
<b>10 h</b>	98,5	1,01	77,0	1,30	74,5	1,34	1,31	2,28
<b>50 h</b>	98,0	1,02	74,5	1,34	71,5	1,40	1,37	4,20

As diferenças entre os métodos de análise dos FR para efeitos conjugados considerados na Tabela 5.5 são pequenas, mas com tendência a aumentarem progressivamente. Os cálculos, neste caso, não contemplaram as extrapolações, uma vez que não há garantias de representatividade do comportamento real. A tendência linear da degradação por hidrólise

indica uma forte e contínua queda nos valores da resistência, tendência que deve se somar aos ensaios de fluência associada. Um comportamento semelhante foi observado nos estudos de East e Rahmam (1999) e Rahmam & Alfaro (2004), melhor detalhados no item 3.4.6. Porém, os ensaios realizados por estes autores não permitiram fazer um perfeito paralelo com uma análise em fluência, uma vez que os carregamentos aplicados, devido à relaxação dos fios, não permaneceram constantes ao longo de todo o ensaio. Ainda assim, mesmo sob pequenas cargas, para solução de 10,09% de NaOH à temperatura ambiente, em 30 dias houve degradação total dos fios. Em vista disso, não se deve descartar a possibilidade de degradação total dos filamentos em algumas centenas de horas.

É provável que ocorram variações não ajustáveis às linhas de tendência nos resultados dos ensaios de fluência associada, principalmente por causa da influência do carregamento na taxa de hidrólise do PET, como mostrou East & Rahman (1999) e Rahmam & Alfaro (2004), resultado assim, em uma soma de efeitos.

A Figura 5.7 apresenta uma análise comparativa dos resultados obtidos através de ensaios isolados de fluência (pontos em azul) e ataques químicos (pontos em verde), com os provenientes dos ensaios de efeitos associados (pontos em rosa). O tratamento dos dados permitiu ainda, inserir pontos da projeção do comportamento da resistência à tração em função do tempo para a consideração do efeito combinado segundo a metodologia atual de cálculo (pontos em vermelho). Optou-se por não extrapolar os resultados dos ensaios de fluência associada sob o risco de gerar valores incompatíveis com a realidade, uma vez que não foi possível ajustar uma única linha de tendência representativa. Entretanto, é notável uma expectativa de queda acentuada nos valores da resistência à tração em função do tempo.

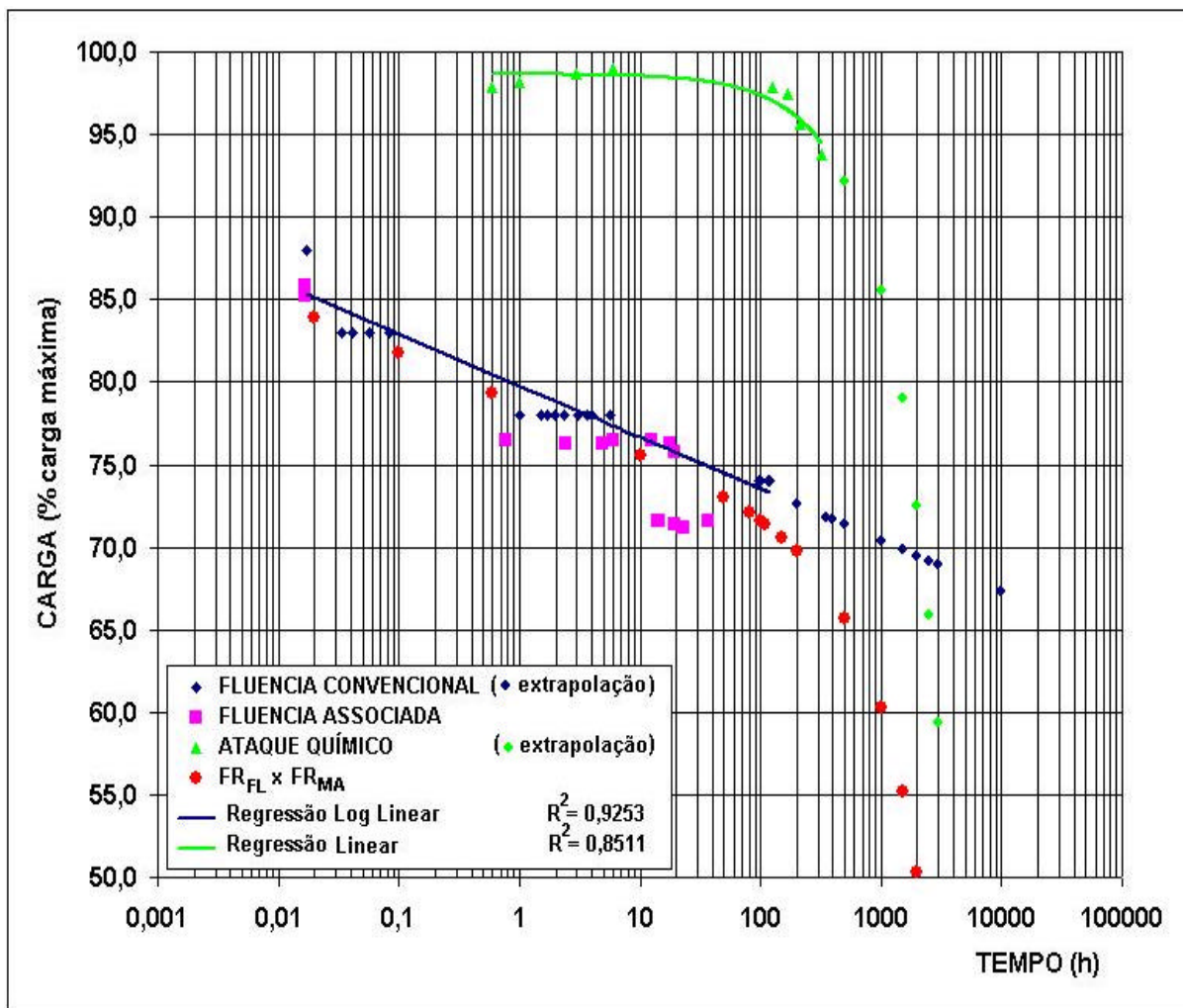


Figura 5.7 – Expectativa de comportamento da degradação devido à hidrólise.



## **CAPÍTULO 6**

### **6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS**

O crescente número de estudos sobre a sinergia entre os Fatores de Redução revela a importância deste assunto face às aplicações dos geossintéticos, principalmente em obras onde esses elementos estejam submetidos às solicitações de tração. Pode-se afirmar, com base nos artigos avaliados, que esta fase vivenciada é apenas inicial, mas já demonstra a necessidade do desenvolvimento contínuo de pesquisas e aprofundamentos sobre o tema.

Diversos trabalhos analisando a influência dos danos de instalação no comportamento em longo prazo dos geossintéticos vêm sendo discutidos na literatura. Não há consenso sobre o conservadorismo ou não da metodologia atual de cálculo. Isso se deve, principalmente, às diferenças nos níveis e tipos de danos aplicados, que influenciam diretamente nos resultados das análises. É conclusivo, porém, que essa metodologia não contempla todas as variáveis necessárias para cálculos onde se deseje precisão elevada, sendo indicado, neste caso, o uso de ensaios específicos.

Pouco se sabe sobre o efeito dos ataques químicos no comportamento mecânico em longo prazo dos geossintéticos. Dois dos principais trabalhos acerca deste tema são os desenvolvidos por East & Rahman (1999) e Rahman & Alfaro (2004). Neles, os autores demonstram que o processo de hidrólise em meio fortemente alcalino é acelerado por tensões

aplicadas ao filamento. Isso gera uma progressiva perda de resistência dos fios que, no caso dos geossintéticos, pode responder pelo limite inferior de sua vida útil. Apesar do foco não estar voltado para o estudo dos Fatores de Redução, pela análise e manipulação dos dados, foi possível concluir que existe uma forte indicação de sinergia entre os  $FR_{MA}$  e  $FR_{FL}$ . O comportamento linear da resistência à tração após hidrólise também ficou evidenciado.

Esse trabalho demonstra a influência dos ataques químicos no processo de degradação do PET, em conformidade com os artigos supracitados. Os resultados dos ensaios alertam para um comportamento e vida útil regido, principalmente, pelo processo de hidrólise. O tratamento linear dos dados dos ensaios indicou uma total destruição dos filamentos em tempos próximos a 4000 horas, enquanto que, no caso da fluência atuando isoladamente, a expectativa ultrapassa as  $10^7$  horas.

O gráfico da Figura 5.7 demonstra a tendência de redução nos valores dos resultados dos ensaios de fluência associada (em rosa) face aos resultados do cálculo pela metodologia tradicionalmente utilizada (em vermelho), principalmente para tempos superiores a 10h. Isso reforça o indício de existência de sinergia entre os  $FR_{MA}$  e  $FR_{FL}$ . Porém, os comportamentos de ambas as associações não seguem um padrão de regressão fixo, dificultando a análise por extrapolação.

A parte experimental desta pesquisa revelou ainda, alguns detalhes que merecem destaque:

- A opção por filamentos como corpos-de-prova é uma consideração que exige cuidados especiais. O fato de requerer baixas cargas para as análises não deve ser um fator decisivo para essa escolha. A maior sensibilidade implica em precisão elevada e, conseqüentemente, procedimentos e equipamentos mais refinados;
- Por outro lado, a maior sensibilidade geral, tanto por parte dos equipamentos, quanto das amostras, evidenciou um problema referente à velocidade de carregamento dos corpos-

de-prova. A norma ISO 13431 (1999) e o projeto NBR 02:153.19-015 (1999) determinam que todo o carregamento deve ser realizado em até 1 minuto. Entretanto, dependendo da rigidez do geossintético em questão, isso representa uma velocidade de deformação superior à sugerida na NBR 12824 (1993) para ensaios de tração unidirecional não confinado, que é de 20mm/min (faixa larga). Nos primeiros ensaios realizados desta forma, ficou nítido que este procedimento gerou cargas dinâmicas, responsáveis, em muitos casos, pela ruína dos corpos-de-prova ainda na fase de carregamento. A utilização de um carregamento contínuo e lento, com pausas pré-determinadas em função da deformação, foi a forma encontrada de reduzir significativamente esse tipo de ocorrência. Após tal mudança nos procedimentos, houve uma convergência nos valores dos tempos de ruptura relativos a uma mesma carga.

- Sempre que se deseja avaliar o ataque químico em um geossintético, é necessário dar especial atenção ao procedimento de preparação dos corpos-de-prova, com destaque para os processos de lavagem, principalmente naqueles compostos por filamentos. Ao longo dos ensaios ficou evidenciado e, posteriormente comprovado, que os fabricantes recorrem a lubrificantes durante o processo de fabricação dos fios, para facilitar o estiramento e bobinamento.

Mais do que a necessidade de continuidade desta linha de pesquisa, os resultados e os próprios ensaios anteviram alguns fatores que merecem destaque e servem de sugestão para trabalhos futuros. São eles:

- Analisar o processo de fluência associada em tempos maiores – como não foi possível ajustar os valores obtidos a uma linha de tendência de forma satisfatória, é necessário que sejam realizados ensaios que contemplem as mudanças na curvatura, pontos de inflexão e tendências de comportamento, a fim de garantir confiabilidade nas extrapolações.

- Realizar os ensaios em corpos-de-prova bidimensionais – os resultados desta pesquisa já justificam uma análise mais refinada. É necessário, portanto, observar os processos de lavagem e homogeneidade dos corpos-de-prova como forma de minimizar o efeito da dispersão da intensidade dos ataques químicos.
- Avaliar, em ensaios de fluência, o efeito do tempo de transferência da carga ao geossintético, com proposições, inclusive, de novas metodologias de carregamento – a aplicação da carga em até 1min pode gerar cargas dinâmicas que interferem significativamente no processo de fluência dos polímeros, principalmente os menos rígidos.
- Revisar o modo de estimativa da resistência no tempo – a metodologia atual de cálculo, onde os fatores de redução parciais são apenas multiplicados diretamente e a consideração da sinergia é atribuída de forma global e com parâmetros empíricos, necessita ser revista e possivelmente, modificada.
- Ampliar o uso da microscopia eletrônica para análises de degradação por ataques químicos

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMENTO, M.; Durabilidade e comportamento de longo prazo geossintéticos – parte I: propriedades mecânicas e hidráulicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995(a), São Paulo. **Anais...** São Paulo: Bartira, 1995. p. 217-226.

ABRAMENTO, M.; Durabilidade e comportamento de longo prazo geossintéticos – parte II: propriedades mecânicas e hidráulicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2., 1995(b), São Paulo. **Anais...** São Paulo: Bartira, 1995. p. 227-236.

ALLEN, T. M.; BATHURST, R. J. Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage. **Geosynthetics International**, v. 3, n. 3, p.407-439, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3822**: standard test method for tensile properties of single textile fibers. New York, 2001

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2256**: standard test method for tensile properties of yarns by single-strand method. New York, 2002.

ARAÚJO, E. E. **Estudo das características físicas, químicas e mecânicas de concreto de resina poliéster**. 1982. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura dos Transportes) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553**: geossintéticos - terminologia. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12824**: geotêxteis - determinação da resistência à tração não confinada: ensaio de faixa larga. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13134**: geotêxteis - determinação da resistência em tração não confinada de emendas em ensaio de faixa larga. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR Projeto 02:153.19-015:** geossintéticos – determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada. Rio de Janeiro, 1999.

BARAS, L. C. S. **Estudo da fluência em geotêxteis através de ensaios não confinados convencionais e acelerados.** 112 f. 2001. Dissertação (Mestrado em geossintéticos) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BASSETT, J. et al. **Análise inorgânica quantitativa.** 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 690p.

BECKHAM, W. K.; MILLS, W. H. Cotton-fabric-reinforced roads. **Eng. News-Record**, Oct. p. 453-455, 1935.

BILLING, J. W.; GREENWOOD, J. H.; SMALL, G. D. Chemical and mechanical durability of Geotextiles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4., 1990, The Hague. **Proceedings...**, Rotterdam: Balkema, 1990. v.2, p. 621-626.

BRADY, K.C. et al. **Installation damage on geotextiles.** Crawthorne: Bridges and Ground Engineering Transport Research Centre, 1994, 56p. (Research Report 382).

BUENO, B. S. **The behaviour of thin walled pipes in trenches.** 325 f. 1987. Thesis (PhD). Leeds University, Leeds.

BUSH, D.I. Evaluation of the effects of construction activities on the physical properties of soil reinforcing elements. In: INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SYMPOSIUM ON THEORY AND PRACTICE OF EARTH REINFORCEMENT, 1988, Fukuoka, Japan. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1988, p.63-68.

BUSH, D. I. Variation of long-term design strength of geosynthetics in temperatures up to 40° C. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES, AND RELATED PRODUCTS, 4., 1990, The Hague. **Proceedings...**, Rotterdam: Balkema, 1990, p.673-676.

BUSH, D. I.; SWAN, D. B. G. An assessment of the resistance of tensar sr2 to physical damage during the construction and testing of a reinforced soilwall: the Application of polymeric reinforcement in soil retaining structures. In: NATO ADVANCED RESEARCH WORKSHOP ON APPLICATION OF POLYMERIC REINFORCEMENT IN SOIL RETAINING STRUCTURES, 1987, Kingston, **Proceedings...** [s.n.], 1987, p. 173-180

BUXBAUM, L. H. The Degradation of poly(ethylene terephthalate). **Angewandte Chemie International Edition**. v. 7, n.3, p. 182-190, 1968.

CALLISTER Jr., W.D. **Material science and engineering: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 1997.

CARNEIRO, J. R. et al. Durabilidade de geotêxteis, exposição a agentes físicos e químicos: alguns resultados experimentais. In: INTERNATIONAL SITE CHARACTERIZATION, 2. Porto, 2004. **Proceedings...** Porto: ISC, 2004. p. 259 – 266

CRAWFORD, R. J. **Plastics engineering**. 3.ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1998. 505p.

COSTA, C. M. L. et al. Estudo da ruptura por fluência de geotêxteis não tecidos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: ABMS-IGS Brasil, 2003. CD.

DEMARQUETE, N. R. **Estrutura e propriedades de polímeros**: introdução à ciência dos materiais para Engenharia. São Paulo: USP, 2001 (Notas de Aula).

EAST, G. C.; RAHMAN, M. Effect os applied stress on the alkaline hydrolysis of geotextile PET: part-1. **Polymer**, v 40, p.2281-2288, 1999.

ELIAS, V.; SALMAM, A.; GOULIAS, D. The effect of pH, resin properties, and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics. **Geosynthetics International**, v. 5, n. 5, p. 459-490, 1998.

FELISBERTI, M.I. **Caracterização de blendas poliméricas através de análise térmica e termomecânica**. Campinas: Unicamp, 1995. 76p (Apostila de curso).

FINNIE, I.; HELLER, W. R. **Creep of engineering materials**. New York: McGraw-Hill Book 1959. 341p.

GREENWOOD, J. H. The assurance of durability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., 1998, Atlanta. **Proceedings...** Roseville: IGS-IFAI USA, 1998. p. 657-662.

GREENWOOD, J. H. The effect of installation damage on the long-term design strength of a reinforcing geosynthetic. **Geosynthetics International**, v. 9, n. 3, p. 247-258, 2002.

HALSE, Y.; KOERNER, R. M.; LORD, A. E. Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. Part 1: Ca OH 2 solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 05, p. 262-282, 1987.

HALSE, Y.; KOERNER, R. M.; LORD, A. E. Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. Part 2: Na OH 2 solutions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 06, p. 295-305, 1987.

HULT, J. A. H. **Creep in engineering structures**. Waltham: Blaisdell Pub., 1966. 115 p.

IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em Análise Térmica. **Cerâmica**, v.26, n.121, p.17-24. 1980.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 554**: standard atmosphere for conditioning and/or testing specifications.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ENV 10722-1**: geotextiles and geotextile-related products: procedure for simulating damage during installation – Part 1: installation in granular materials. 1997

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 13434**: geotextiles and geotextiles - related products - guidelines on durability, 1998. 34 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/ENV 13431**: geotextiles and geotextile-related products - determination of tensile creep and creep rupture behavior, 1999 16p.

KAY, D.; BLOND, E.; MLYNAREK, J. Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue. In: CANADIAN GEOTHECNICAL CONFERENCE, 57., Quebec, 2004. **Proceedings...** [s.l.n.], 2004. p. 01-14 (session 4D)

KOERNER, R. **Designing with Geosynthetics** 4.ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1998. 760p.

KOERNER, G. R.; HSUAN, Y. G.; HART, M. Field measured parameters effecting the durability of Geosynthetics. **GRI Report**. v.26, GSI, Folsom, 105p. 2001



KOERNER, G. R.; HSUAN, Y. G.; KOERNER, R.M. Field measurements of alkalinity pH levels behind segmental retaining walls, or SRWs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: Swets & Zeitlinger, 2002. p. 1431-1434 (v. 4)

KRUMM G. **Der einfluss mechanischer shadigung auf das kriechverhalten von technischem filament – garn aus polyethylenterephtalat.** Tese (Dr Ing. thesis), RWTH Aachen – Aachen. 1988

LAINÉ D.L. ; DARILEK G.T. Locating leaks in geomembrane liners of landfills covered with a protective soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1993, Vancouver. **Proceedings...**, Roseville: IFAI, 1993. p.403-1412 (v. 3).

LAUNAY, A.; THOMINETTE, F.;VERDU, J. Hydrolysis of poly (ethylene terephthalate) a kinetic study. **Polymer Degradation and Stability.** v. 46, p. 319. 1994

LEE, J. D. **Química inorgânica não tão concisa.** São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 452p.

LOURENÇO, V.L. et al. Discussão da aplicabilidade de análises TMA e DMA para controle de qualidade de geossintéticos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: ABMS / IGS Brasil. 2003. CD.

MANCINI, S. D.; ZANIN, M. A influência de meios reacionais na hidrólise de PET pós-consumo. **Polímeros: Ciência e Tecnologia.** v.12, n.1, p. 34-40, 2002.

MELO, L. **Metodologia de ensaios de durabilidade dos geossintéticos face a agentes químico.** 1990. Trabalho de Graduação (Infra-Estrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

MANO, E.B.; MENDES, L.C. **Introdução a polímeros.** São Paulo: Edgard Blücher. 1999. 191p.

MORITA, T.; ASSUMPCÃO, R.M.V. **Manual de soluções, reagentes e solventes.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1972.

PAULA, et al. Danificação durante a instalação de geotêxteis não tecidos: análise laboratorial da influência do tipo de material granular e da energia de compactação. In: INTERNATIONAL SITE CHARACTERIZATION, 2., 2004, Porto. **Proceedings...** Porto: ISC, 2004 p.239 – 248.

PEGGS I.D. Practical geoelectric leak surveys with hand-held, remote and water lance probes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1993, Vancouver. **Proceedings...**, Roseville: IFAI, 1993. p.1523 – 1532.

PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. Danificação durante a instalação e fluência de geossintéticos: resultados experimentais. Coeficientes de segurança a aplicar. In: INTERNATIONAL SITE CHARACTERIZATION, 2., 2004, Porto. **Proceedings...** Porto: ISC, 2004. p.249 – 258

PINHO LOPES, M. et al. Installation damage and creep of geosynthetics and their combined effect – experimental analysis. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 2., 2000. Bologna. **Proceedings...** Bologna: Patron. 2000, p 895-897 (v.2).

PINHO LOPES, M. et al. Experimental analysis of the combined effect of installation damage and creep of geosynthetics - new results. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: Swets & Zeitlinger, 2002. p.1539-1544.

RAHMAN, M.; ALFARO, M. Degradation of polyester geotextiles in alkaline solutions under applied loading. In: CANADIAN GEOTHECNICAL CONFERENCE, 57., Quebec, Canadá, 2004. **Proceedings...** [s.l.n.], 2004. p. 33-39 (section 4D)

ROLLIN, A. L. et al. Leak location in exposed geomembrane liners using an electrical leak detection technique. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1999, Boston, USA. **Proceedings...** Roseville: IFAI, 1999. p. 615-626 (v.2).

RODRIGUEZ, F. **Principles of polymer system**. 3. ed. New York: Taylor & Francis. 1989. 640p.

SALMAN , A. et al. Durability of geosynthetics based on accelerated laboratory testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1997, Long Beach. **Proceedings...** Roseville: IFAI , 1997. p. 217-234 (v.1)

SCHRÖER, S. et al. Stepped isothermal method to determine a combined reduction factor for creep and installation damage. In EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 2., 2000. Bologna, Italy. **Proceedings...** Bologna: Patron. 2000. p. 351-355.

SPINACÉ, M.A.S. **Poli (tereftalato de etileno): reprocessamento por extrusão e metodologias de caracterização**. 122f. 2000. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

THORNTON, J.S. et al. The stepped isothermal method for time-temperature superposition and its application to creep data on polyester yarn. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., 1998(a), Atlanta. **Proceedings...** Atlanta, 1998. p. 699-706.

THORNTON, J.S.; PAULSON, J.N.; SANDRI, D. Conventional and stepped isothermal methods for characterizing long term creep strength of polyester geogrids. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., 1998(b), Atlanta, EUA. **Proceedings...** Roseville: IFAI, 1998. p. 691-698.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

VIEZEE, D.J. et al. Designing soil reinforcement with woven geotextiles: the effect of mechanical damage and chemical ageing on the long-term performance of polyester fibers and fabrics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4., 1990, The Hague. **Proceedings...**, Rotterdam: Balkema, 1990, p. 651-656 (v.2)

VIDAL, D.; FABRIN, T.; MONTEZ, F.T. O conceito de Fatores de redução aplicados as propriedades dos geossintéticos. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSINTÉTICOS, 1., / SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 3., 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999, p.189-198 (v.1).

VIDAL, D. M. **Os geossintéticos e suas principais aplicações**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002. (Apostila de Curso).

WATTS, G.R.A.; BRADY, K.C. Installation damage and the measurement of tensile strength. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 5., 1994. Singapore. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1994

ZORNBERG, J.G. et al. Creep of geotextiles using time-temperature superposition methods. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v. 130, n. 11, p. 1158-1168, 2004

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TM	2. DATA 24 de junho de 2005	3. DOCUMENTO N° CTA/ITA-IEI/TM-005/2005	4. N° DE PÁGINAS 123
5. TÍTULO E SUBTÍTULO:  Análise da sinergia entre fatores de redução em geossintéticos submetidos a esforços de tração.			
6. AUTOR(ES):  <b>Renato Satoshi Trentini</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):  Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura – ITA/IEI			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:  Geossintéticos, Fatores de Redução, PET, Fluência			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:  Geossintéticos; Tereftalato de polietileno; Análise de fluência; Hidrólise; Polímeros; Ensaio de materiais; Mecânica dos solos; Geotecnia; Engenharia civil			
10. APRESENTAÇÃO:  ITA, São José dos Campos, 2005, 123 páginas		<b>X Nacional    Internacional</b>	
11. RESUMO:  Os Fatores de Redução Parciais (FRp) contemplam a estimativa das perdas de resistência à tração dos geossintéticos com o decorrer da vida útil em uma aplicação geotécnica. Esses valores são obtidos através de ensaios que consideram, isoladamente, os diversos tipos de degradação a que esses elementos possam ser expostos. A metodologia convencional sugere que a resistência a tração do geossintético, no tempo de projeto, seja dada pela resistência à tração característica dividida pelo produto de todos os FRp e um fator de segurança (FS) relativo à extrapolações, sinergias, etc. Neste conceito, pouco se conhece a respeito da sinergia entre os FRp e, ao assumir valores empíricos, há o risco de incorrer em um sobredimensionamento ou, por outro lado, desfavorecer a segurança da obra.  Este trabalho alerta, em sua revisão bibliográfica, para os efeitos dos danos de instalação no comportamento em longo prazo dos geossintéticos destinados a reforço. É conclusiva a necessidade de rever a atual metodologia de cálculo utilizada. Nesta mesma linha, o efeito sinérgico da hidrólise e fluência em filamentos de PET é debatido e estudado através de ensaios especificamente desenvolvidos para esta análise. Os resultados, dentre outras contribuições, destacam a necessidade imediata de continuidade deste estudo com aplicação em corpos-de-prova bidimensionais. Problemas e sugestões relativas aos mecanismos e procedimentos de ensaios são, também, enfatizados.			
12. GRAU DE SIGILO:  <b>(X) OSTENSIVO            ( ) RESERVADO            ( ) CONFIDENCIAL            ( ) SECRETO</b>			