Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 31 / 08 / 01

Ass.: Guilherme

ESTUDO DA FLUÊNCIA EM GEOTÊXTEIS ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO CONFINADOS CONVENCIONAIS E ACELERADOS

Luiz Claudio Schwarz Baras

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Geotecnia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036726

São Carlos
2001

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUIZ CLAUDIO SCHWARZ BARAS**

Dissertação defendida e julgada em 04-07-2001 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **BENEDITO DE SOUZA BUENO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Doutor **JORGE GABRIEL ZORNBERG**
(University of Colorado at Boulder)

Aprovado

Prof. Titular **MAURICIO ABRAMENTO**
(Fundação Armando Álvares Penteado - FAAP)

aprovado

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais, Viktor e Esther;
às minhas irmãs, Léa e Frances;

dedico esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno, pela excelente orientação, amizade e principalmente pelos ensinamentos.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, pelo estímulo constante e a convivência.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, especialmente à secretária Maristela Batissaco e aos técnicos José Luís Guerra e Oscar dos Santos Neto, pela ajuda em todos os momentos.

Aos professores Paulo Seleglim Jr. e Josmar Pagliuso, pelo auxílio na construção da câmara para ensaios acelerados.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Às empresas Ober e Bidim, pela doação dos geotêxteis. Em especial, aos engenheiros Sílvio Luiz Palma e Roberto Aramaki, pelo apoio e amizade.

Aos professores de geotecnia da UFPR, Paulo Roberto Chamecki e Nei Augusto Nascimento, pelo incentivo dado aos prosseguimentos de meus estudos na área.

Ao grupo de pesquisa em geossintéticos, pela amizade e constante troca de conhecimentos, em especial à Carina Maia Lins Costa, pela inestimável ajuda, amizade e apoio.

A todos os colegas da turma de mestrado em geotecnia de 1999, por todos os momentos que dividimos, por toda colaboração e pela amizade que ficou.

Aos grandes amigos que fiz em São Carlos, Igor, Rogério, Jocy, Basilio, Irahya, Sidnei, Vinicius e Dirlane, pelo apoio em todos os momentos.

Aos amigos de Curitiba, todos, os quais não cito nomes para não omitir nenhum.

Aos meus tios Izhak e Regina e primos Jaime, Vivian e Daniela, bem como toda minha família, pelo constante apoio.

Com todo meu amor e respeito, deixo um agradecimento especial, àqueles que são os grandes responsáveis por todas as conquistas de minha vida, meus pais Viktor e Esther e minhas irmãs Léa e Frances, a vocês, meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 OBRAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOTÊXTIL.....	3
2.1.1 <i>Tipos de obras de solo reforçado com geotêxtil</i>	4
2.1.2 <i>Consideração da fluência no dimensionamento de obras de solo reforçado com geotêxtil</i> ..	5
2.2 FLUÊNCIA EM GEOTÊXTEIS	9
2.2.1 <i>O fenômeno da fluência</i>	9
2.2.2 <i>O comportamento de fluência em geotêxteis</i>	9
2.2.2.1 Rigidez a longo prazo dos geotêxteis – Curvas isócronas	12
2.2.3 <i>Ruptura por fluência em geotêxteis</i>	14
2.2.3.1 Resistência a longo prazo dos geotêxteis - Curvas de ruptura por fluência	14
2.2.4 <i>Fatores intervenientes na fluência de geotêxteis</i>	15
2.2.4.1 Polímero	16
2.2.4.2 Tipo de geotêxtil	18
2.2.4.3 Nível de carregamento.....	19
2.2.4.4 Confinamento.....	21
2.2.4.5 Temperatura.....	25
2.3 ENSAIO DE FLUÊNCIA EM GEOTÊXTEIS.....	27
2.3.1 <i>Ensaio de fluência em geotêxteis não confinados</i>	27
2.3.1.1 Equipamento básico	29
2.3.1.2 Representações gráficas da fluência	30
2.3.1.3 Resultados obtidos em pesquisas anteriores.....	32
2.3.2 <i>Ensaio de fluência em geotêxteis confinados</i>	35
2.3.2.1 Equipamentos utilizados.....	35
2.3.3 <i>Ensaio acelerados não confinados de fluência</i>	38
2.3.3.1 Superposição tempo-temperatura (STT)	39

2.3.3.2 A equação de Arrhenius.....	39
2.3.3.3 A equação William Landel Ferry (WLF).....	41
2.3.3.4 Ensaios acelerados não confinados de fluência – Tipo Convencional.....	42
2.3.3.5 Ensaios acelerados não confinados de fluência – <i>Stepped Isothermal Method</i>	47
3 MATERIAL E MÉTODOS	51
3.1 MÉTODO DE LEITURA DOS ALONGAMENTOS	51
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	55
3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	56
3.4 SISTEMA DE APLICAÇÃO DAS CARGAS	57
3.5 ENSAIOS CONVENCIONAIS NÃO CONFINADOS DE FLUÊNCIA	60
3.5.1 Programação dos ensaios.....	61
3.5.2 Execução do ensaio	61
3.6 ENSAIOS ACELERADOS NÃO CONFINADOS DE FLUÊNCIA – <i>STEPPED ISOTHERMAL METHOD</i> (SIM).....	62
3.6.1 A câmara de temperatura controlável	63
3.6.2 Roteiro do ensaio.....	65
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	68
4.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	68
4.1.1 Ensaios convencionais.....	68
4.1.2 Ensaios acelerados.....	72
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	75
4.2.1 Ensaios convencionais.....	75
4.2.1.1 Influência do nível de carregamento.....	75
4.2.1.2 Influência do tipo de geotêxtil.....	79
4.2.1.3 Verificação da homogeneidade dos geotêxteis através das curvas de fluência	82
4.2.1.4 Curvas Isócronas dos geotêxteis ensaiados	84
4.2.2 Ensaios acelerados não confinados de fluência – <i>Método SIM</i>	88
4.2.2.1 Comparação das curvas obtidas em ensaios convencionais e acelerados	89
4.2.2.2 Comparação estatística das curvas de fluência obtidas pelo método SIM e convencional.....	100
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	103
5.1 CONCLUSÕES	103
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE 1	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Maciço reforçado em 2 zonas, ativa e passiva	5
FIGURA 2.2 – Obtenção da resistência à tração de projeto para geotêxteis através da isócrona.....	8
FIGURA 2.3 – a) Curva típica da deformação em função do tempo para geotêxteis – fluência. b) Taxas de deformação em função do tempo (CAZZUFFI <i>et al.</i> , 1997)	10
FIGURA 2.4 – Obtenção das curvas isócronas.....	12
FIGURA 2.5 – Análise de equilíbrio de um maciço reforçado pela compatibilidade de deformação solo-geotêxtil	13
FIGURA 2.6 – Obtenção da resistência à tração de um geotêxtil a partir da curva de ruptura por fluência.	15
FIGURA 2.7 – Ensaio de fluência em elementos lineares dos polímeros PE, PP, PET e PA a 60% da resistência última. (VAN ZANTEN, 1986).....	17
FIGURA 2.8 – Ensaio de fluência em elementos lineares dos polímeros PE, PP, PET e PA a 20% da resistência última. (VAN ZANTEN, 1986).	17
FIGURA 2.9 – Curvas de fluência para os geotêxteis não tecidos termoligados de filamento contínuo de PET e PP a 20°C, sob diferentes níveis de carregamento (L). (MATICHARD <i>et al.</i> , 1990).	19
FIGURA 2.10 – Curvas de fluência para o geotêxtil tecidos de laminetes de PP a 20°C, sob dois níveis de carregamento. (MATICHARD <i>et al.</i> , 1990).	20
FIGURA 2.11 – Resultados de ensaios de fluência em (a) geotêxtil não tecido termoligado 67% PP e 33% PE e (b) geotêxtil não tecido agulhado 100% PET (McGOWN <i>et al.</i> 1982).	22
FIGURA 2.12 – Ensaio não confinado x Ensaio confinado em geotêxtil não tecido de PET (BALLEGEEER & WU, 1993).	23
FIGURA 2.13 – Ensaio não confinado x Ensaio confinado em geotêxtil não tecido de PP (BALLEGEEER & WU, 1993).....	23
FIGURA 2.14 – Ensaio não confinado x Ensaio confinado em geotêxtil tecido de PP (BALLEGEEER & WU, 1993).	24

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.15 – Curvas carga <i>versus</i> deformação para ensaios de tração em geotêxtil não tecido agulhado de PET, confinado em silte sob diversas tensões (TUPA & PALMEIRA, 1995).....	24
FIGURA 2.16 – Variação na rigidez secante do geotêxtil em função da deformação e confinamento (TUPA & PALMEIRA, 1995).....	25
FIGURA 2.17 – Curvas de fluência para geotêxtil de PP a 20, 40 e 60°C (MATICHARD <i>et al.</i> , 1990).....	26
FIGURA 2.18 – Equipamento básico para ensaios não confinados de fluência (McGOWN <i>et al.</i> , 1986).....	29
FIGURA 2.19 – Aspecto de curvas tipo deformação total <i>versus</i> tempo para carregamentos distintos (McGOWN <i>et al.</i> , 1986).....	30
FIGURA 2.20 – Aspecto esquemático das curvas	31
FIGURA 2.21 – Curvas Sherby-Dorn esquemáticas.....	31
FIGURA 2.22 – Curva de fluência para o geotêxtil não tecido agulhado de PET com carga equivalente a 60% de sua resistência à tração (COSTA, 1999).	32
FIGURA 2.23 – Curvas de fluência para o geotêxtil não tecido agulhado de PP com carga equivalente a 23, 46 e 60% de sua resistência à tração (COSTA, 1999).....	33
FIGURA 2.24 - Curvas de fluência para o geotêxtil B, todas para o mesmo carregamento (40%), denotando a variabilidade do material (COSTA, 1999).	34
FIGURA 2.25 – Esquema do equipamento de ensaio confinado de fluência de McGOWN <i>et al.</i> (1982).....	36
FIGURA 2.26 – Equipamento para ensaios confinados, modificado do ensaio triaxial convencional em solo (WU, 1991).....	38
FIGURA 2.27 – Esquema do equipamento com forno acoplado para ensaios acelerados (FARRAG, 1998).....	43
FIGURA 2.28 – Esquema de translação gráfica baseado no princípio de STT (FARRAG, 1998).....	44
FIGURA 2.29 – Resultados de ensaios de fluência em geogrelha de PEAD em cinco condições de temperatura (FARRAG & SHIRAZI, 1997).....	44

FIGURA 2.30 – Curva obtida dos ensaios acelerados da Figura 2.29 <i>versus</i> curva obtida em ensaio convencional em geogrelha de PEAD (FARRAG, 1998).....	45
FIGURA 2.31 – Ensaio acelerado x ensaio convencional, discrepância relacionada com o alto nível de carregamento aplicado (FARRAG, 1998).....	46
FIGURA 2.32 – Fatores de translação calculados pela equação WLF (FARRAG, 1998).....	47
FIGURA 2.33 – Fatores de translação obtidos graficamente (FARRAG, 1998).....	47
FIGURA 2.34 – Princípio da superposição de Boltzman para materiais viscoelásticos (THORNTON <i>et al.</i> , 1998).....	48
FIGURA 2.35 – 1º passo do método SIM	49
FIGURA 2.36 – 2º passo do método SIM	49
FIGURA 2.37 – 3º passo do método SIM.	50
FIGURA 2.38 – 4º passo, obtenção da curva de fluência para longos períodos.....	50
FIGURA 3.1 – Vista da régua metálica, base para a referência global, fixada no pendural de ensaio.	52
FIGURA 3.2 – Marcas para leitura fixadas no CP.....	52
FIGURA 3.3 – Imagem do início de um ensaio de fluência com os pontos de referência e de leitura digitalizados no AUTOCAD 14.	53
FIGURA 3.4 – Matriz gerada para calibração do método associado ao material utilizado.	54
FIGURA 3.5 – Corpo de prova do ensaio de fluência. A área central, quadriculada, é o espaço de prova, as extremidades são impregnadas de resina e solidarizadas às garras.	57
FIGURA 3.6 – Equipamento para ensaio de fluência desenvolvido por COSTA (1999) e utilizado nesta pesquisa.	58
FIGURA 3.7 – Garra utilizada nos ensaios de fluência (COSTA, 1999).....	59
FIGURA 3.8 – Dispositivos de aplicação de carga do ensaio de fluência. À esquerda encontra-se o disco de sustentação. Ao centro, o tarugo, responsável pela ligação da carga à garra inferior. À direita pode-se observar o conjunto de carga montado.	59

FIGURA 3.9 – Equipamentos utilizados para aplicação do carregamento. A frente, o macaco hidráulico tipo “jacaré”. Atrás, o equipamento denominado “girafa”	60
FIGURA 3.10 – Croquis da câmara para execução dos ensaios acelerados – dimensões em mm, sem escala – a) vista frontal; b) vista lateral; c) vista superior.	63
FIGURA 3.11 – Equipamento para ensaio acelerado: pendural individual e câmara isolada com isopor para forro, dotada de resistências elétricas (não constam nesta foto os ventiladores, que fazem parte do sistema).	65
FIGURA 4.1 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GA3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	69
FIGURA 4.2 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GA4, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	69
FIGURA 4.3 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GA5, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	70
FIGURA 4.4 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GB3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	71
FIGURA 4.5 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GB4 sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	71
FIGURA 4.6 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GB5, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	72
FIGURA 4.7 – Esquema da translação vertical utilizada para compensação da contração térmica no ensaio SIM.	73
FIGURA 4.8 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Acelerado, geotêxtil GA 3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	74

FIGURA 4.9 - Deformação total <i>versus</i> tempo – Ensaio Acelerado, geotêxtil GB3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.	74
FIGURA 4.10 – Crescimento dos coeficientes de fluência médios, para os geotêxteis GA e GB em função do carregamento aplicado.....	78
FIGURA 4.11 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 10% das suas resistências à tração.....	79
FIGURA 4.12 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 20% das suas resistências à tração.....	80
FIGURA 4.13 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 40% das suas resistências à tração.....	80
FIGURA 4.14 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 60% das suas resistências à tração.....	81
FIGURA 4.15 – Curvas de fluência classificadas pelo nível de carregamento – GA.	83
FIGURA 4.16 – Curvas de fluência classificadas pelo nível de carregamento – GB....	83
FIGURA 4.17 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GA3.	84
FIGURA 4.18 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GA4.	84
FIGURA 4.19 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GA5.	85
FIGURA 4.20 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GB3.	85
FIGURA 4.21 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GB4.	86
FIGURA 4.22 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GB5.	86
FIGURA 4.23 – Análise da perda de rigidez devido à fluência para os geotêxteis GA5 e GB5.....	88
FIGURA 4.24 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GA3 carregado com carga equivalente a 10% de sua resistência à tração.	90

FIGURA 4.25 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GA3 carregado com carga equivalente a 20% de sua resistência à tração.	90
FIGURA 4.26 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GA3 carregado com carga equivalente a 40% de sua resistência à tração.	91
FIGURA 4.27 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GA3 carregado com carga equivalente a 60% de sua resistência à tração.	91
FIGURA 4.28 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3 carregado com carga equivalente a 10% de sua resistência à tração.	92
FIGURA 4.29 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3 carregado com carga equivalente a 20% de sua resistência à tração.	92
FIGURA 4.30 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3 carregado com carga equivalente a 40% de sua resistência à tração.	93
FIGURA 4.31 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3 carregado com carga equivalente a 60% de sua resistência à tração.	93
FIGURA 4.32 – Comparação entre as deformações iniciais dos ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GA.	95
FIGURA 4.33 – Comparação entre os coeficientes de fluência para os ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GA.	95
FIGURA 4.34 – Comparação entre as deformações iniciais dos ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GB.	96
FIGURA 4.35 – Comparação entre os coeficientes de fluência para os ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GB.	96

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 - Fatores de redução da resistência à tração por efeito da fluência (KOERNER, 1998).....	7
TABELA 2.2 - Comparação entre as normas para ensaios de fluência em geotêxteis não confinados	28
TABELA 3.1 - Resultados da averiguação de precisão:	55
TABELA 3.2 - Características de fabricação dos geotêxteis ensaiados.....	55
TABELA 3.3 - Resultados da caracterização dos geotêxteis ensaiados.....	56
TABELA 3.4 - Ensaios convencionais programados.....	61
TABELA 4.1 - Coeficientes da regressão linear para os ensaios convencionais de fluência não confinada com o geotêxtil GA – Modelo: $y = a \ln(x) + b$:.....	76
TABELA 4.2 - Coeficientes da regressão linear para os ensaios convencionais de fluência não confinada com o geotêxtil GB – Modelo: $y = a \ln(x) + b$:.....	77
TABELA 4.3 - Comparação entre as deformações iniciais e coeficientes de fluência das regressões lineares dos ensaios convencionais com os geotêxteis GA3 e GB3.....	81
TABELA 4.4 - Tempos de duração e resposta dos ensaios acelerados.....	89
TABELA 4.5 - Apresentação dos coeficientes das retas obtidas por regressão linear para os resultados dos ensaios acelerados e convencionais – Modelo: $y = a \ln(x) + b$	94
TABELA 4.6 - Comparação estatística dos ensaios SIM e convencional.....	102

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

a_t	Fator de translação em ensaios acelerados de fluência
f_m	- Fator devido às incertezas de processos como extrapolação de resultados de ensaios, dispersão dos mesmos, problemas de fabricação dos geossintéticos, etc.
FR_{amb}	- Fator de redução devido aos danos ambientais
FR_{db}	- Fator de redução devido à degradação biológica
FR_{di}	- Fator de redução devido a danos de instalação
FR_{dm}	- Fator de redução devido aos danos mecânicos de instalação
FR_{dq}	- Fator de redução devido à degradação química
FR_{fl}	- Fator de redução devido à fluência
NT	- Geotêxtil não tecido
PA	- Poliamida
PE	- Polietileno
PEAD	- Polietileno de alta densidade
PEBD	- Polietileno de baixa densidade
PET	- Poliéster
PP	- Polipropileno
SIM	- Stepped Isothermal Method
SRG	- Solo reforçado com geotêxtil
T	- Resistência à tração
$T(\epsilon, t, \theta)$	- Resistência à tração para uma deformação ϵ , em um tempo t a uma temperatura θ
T_{adm}	- Resistência à tração admissível do geotêxtil
T_g	- Temperatura de transição vítrea
T_{proj}	- Resistência à tração de projeto do geotêxtil
T_{ref}	- Resistência à tração de referência do geotêxtil ao final da vida útil da obra
T_{ult}	- Resistência à tração última do geotêxtil (de curto prazo)
ϵ_0	- Deformação específica instantânea

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- ϵ_I - Deformação específica devida à fluência primária
- ϵ_{II} - Deformação específica devida à fluência secundária
- ϵ_{III} - Deformação específica devida à fluência terciária

Resumo

BARAS, L.C.S. (2001). Estudo da fluência em geotêxteis através de ensaios não confinados convencionais e acelerados. São Carlos, 2001. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta resultados de ensaios de fluência não confinada executados pelo modo convencional e acelerado. Foi possível avaliar alguns parâmetros que influenciam o fenômeno da fluência em geotêxteis não tecidos, e ainda comparar o comportamento dos dois geotêxteis ensaiados, um de polipropileno e outro de poliéster. Construíram-se as curvas isócronas dos materiais estudados e as análises das mesmas mostram que os geotêxteis de poliéster sofrem menores reduções de rigidez quando submetidos a carregamentos constantes do que os geotêxteis de polipropileno. Os resultados dos ensaios acelerados apresentam-se estatisticamente compatíveis com os resultados convencionais, denotando a viabilidade do *Stepped Isothermal Method* (SIM) como ensaio de caracterização da fluência não confinada para geotêxteis não tecidos.

Palavras-chave: geotêxteis; fluência não confinada; ensaios acelerados; *stepped isothermal method*.

Abstract

BARAS, L.C.S. (2001). Creep of geotextiles through conventional and accelerated unconfined tests. São Carlos, 2001. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents results of conventional and accelerated unconfined creep tests. Some factors that influence the creep behavior of nonwoven geotextiles are evaluated. The performance of polypropylene and polyester geotextiles is also compared. Isochronous curves show that the polyester geotextiles have a smaller rigidity reduction when compared with the polypropylene geotextiles when submitted to constant loads. The results of the accelerated tests are statistically compatible with the results of conventional tests, indicating that the Stepped Isothermal Method is a feasible approach for characterizing the creep behavior of nonwoven geotextiles.

Keywords: geotextiles; unconfined creep; accelerated test; stepped isothermal method

1. INTRODUÇÃO

A utilização de geotêxteis em obras geotécnicas pode permitir ao engenheiro projetar com maior economia e melhor desempenho técnico, quando se comparam as soluções dadas às convencionais de engenharia. No que se refere ao custo, em obras rodoviárias, por exemplo, CRISTOPHER *et al.* (1990) mostram que as porcentagens de economia geradas por obras de contenção que utilizam geossintéticos atingem de 10 a 50%, sendo que os maiores percentuais são obtidos quando há piores condições de apoio, uma vez aceitam maiores deformações e, portanto, não necessitam de fundações especiais. Além disto, por serem materiais sintéticos e porosos podem facilitar a adequação do projeto às exigências de preservação do meio ambiente, pois limitam o uso de materiais nobres, facilitando o uso de solos locais, e restringem fenômenos erosivos

Como qualquer outro material de construção, os geotêxteis precisam ser bem caracterizados sob diversos aspectos relativos aos seus comportamentos mecânico e hidráulico. Em obras de solo reforçado com geotêxteis (SRG) são particularmente de interesse os aspectos de interação entre solo e inclusões.

Nessas obras, os geotêxteis permanecem durante toda a vida útil submetidos a esforços de tração. Todo material, nestas condições, apresenta fluência, ou seja, suas deformações sofrem acréscimos ao longo do tempo, mesmo permanecendo constantes as cargas aplicadas. Em alguns materiais, este fenômeno pode ter pouca importância na temperatura ambiente; já para os geotêxteis, o fenômeno assume proporções que não permitem o desconhecimento de tal fato, uma vez que eles são fabricados a partir de polímeros (JEWELL & GREENWOOD, 1988).

As curvas isócronas, que relacionam cargas aplicadas com as respectivas deformações por fluência para tempos definidos, são de grande importância para os

projetos de SRG. A partir delas é possível adotar resistências à tração de projeto nas quais os efeitos da fluência já estão embutidos. Evita-se assim a utilização de coeficientes de segurança elevados, que muitas vezes não são adequados ao projeto.

A prática da utilização de fatores de redução da resistência à tração obtida em ensaios rápidos, para se levar em conta os efeitos da fluência em projetos de SRG, é, no entanto, prática corrente, pois as curvas isócronas não são disponíveis na grande maioria dos casos.

A obtenção de um conjunto de curvas isócronas exige muitos ensaios de fluência que, quando executados pelo modo convencional, são bastante onerosos por demandarem muito tempo, bem como excessivos cuidados com o ambiente de ensaio.

O quadro apresentado denota a necessidade de pesquisas quanto às formas de obtenção das curvas isócronas. Destacam-se, neste contexto, os esforços de pesquisas dirigidas ao estudados dos ensaios acelerados de fluência.

O *Stepped Isothermal Method* (SIM) é uma das alternativas viáveis para estudo da fluência, acelerada pelo aumento de temperatura no ambiente de ensaio. Apesar da potencialidade, os ensaios acelerados são pouco difundidos, sendo portanto, necessárias pesquisas para validá-los e difundi-los. No Brasil, não há registro de nenhum trabalho desta natureza que tenha sido realizado até a presente data.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivos:

- a) quantificar a fluência não confinada de seis geotêxteis brasileiros, segundo a norma ISO 13431 (1998), sendo três fabricados a partir de polipropileno (PP) e três a partir de poliéster (PET) ;
- b) construir e testar um equipamento para executar ensaios acelerados de fluência;
- c) verificar a viabilidade do emprego do *Stepped Isothermal Method* (SIM) como um método de ensaios rápidos para a caracterização de fluência de geotêxteis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo descreve aspectos relativos à fluência de geotêxteis e suas implicações em obras de SRG. Além disto, apresentam-se os métodos convencionais para a determinação da fluência de geotêxteis e propostas de aceleração de fluência através de elevação da temperatura de ensaio.

2.1 Obras de solo reforçado com geotêxtil

A técnica de reforçar solos através de inclusões resistentes à tração não é nova, sendo praticada desde tempos remotos. A introdução da terra armada por Henri Vidal, na década de 60, evidenciou as vantagens desta solução em relação às obras geotécnicas convencionais (INGOLD, 1982; MITCHELL & VILLET, 1987). A principal vantagem deste método é a que o solo torna-se um elemento ativo, que interage com as inclusões para garantir a estabilidade das estruturas de terra, sem a necessidade de uma face resistente ou de elementos de ancoragem. Além disto, muitas vezes, a utilização da técnica de reforço de solos viabiliza a construção de obras diretamente sobre solos de má qualidade (VAN ZANTEN, 1986).

O sucesso da terra armada incitou o desenvolvimento de variantes desta idéia, cuja solução alternativa de maior destaque é, sem dúvida, o uso de solos reforçados com geossintéticos.

Dentre os geossintéticos possíveis de serem utilizados em obras de reforço de solos destacam-se as geogrelhas e os geotêxteis. No Brasil, por razões históricas e de economia, estes últimos têm sido os mais utilizados.

Os geotêxteis apresentam apreciável resistência à tração, quando inseridos em maciços compactados, geram um meio heterogêneo, que pode ser mais resistente e menos deformável, quando comparado ao comportamento do solo isolado (PALMEIRA, 1999).

As obras de solo reforçado com geotêxtil são, portanto, alternativas bastante viáveis em diversas situações corrente em geotecnia.

2.1.1 Tipos de obras de solo reforçado com geotêxtil

É útil classificar as obras de solo reforçado com geossintéticos (SRG) em duas categorias. A primeira é formada por obras em que o reforço é solicitado apenas por um curto período de tempo. Os aterros sobre solos moles são um exemplo típico deste tipo de solução. Neles, em geral, a resistência à tração do geotêxtil é requerida apenas durante o processo de consolidação do solo de fundação (JEWELL, 1996), caso a velocidade de adensamento seja demasiadamente lenta, a resistência à tração do reforço será solicitada por períodos consideráveis. Nesta categoria incluem-se, também, as obras provisórias de contenção.

A segunda categoria de obras são aquelas em que o reforço permanece tracionado durante toda a vida útil. São exemplos típicos:

- taludes íngremes em SRG: Nestas obras, forças de peso próprio do solo e externas geram esforços instabilizantes que agem no sentido de induzir-lhe uma ruptura segundo mecanismos próprios. A estabilidade da obra é medida por um fator de segurança definido como uma relação entre os esforços resistentes disponíveis e os esforços solicitantes que atuam na direção de um possível escorregamento. Em taludes reforçados, à resistência interna do solo soma-se a resistência à tração da manta (JEWELL, 1996). Desta forma, o coeficiente de segurança cresce à medida que o número de inclusões aumenta. Determinando-se o número adequado de inclusões, pode-se, portanto, projetar taludes mais íngremes, com conseqüente economia de material de aterro;
- estruturas de contenção e encontros de pontes em SRG : muros em solo reforçado assemelham-se muito aos taludes íngremes. JEWELL (1996) os diferencia pelo

ângulo que a face faz com a horizontal. Nos muros de arrimo este ângulo varia entre 80 e 90°. Devido a esta maior inclinação, nos casos das estruturas de contenção em solo reforçado, tornam-se mais críticos os fatores de projeto relativos à capacidade de carga da fundação, à capacidade da estrutura suportar cargas externas e às deformações da face.

2.1.2 Consideração da fluência no dimensionamento de obras de solo reforçado com geotêxtil

No projeto de obras de solo reforçado, devem ser verificadas as estabilidades externa, similar à das obras convencionais, e a interna. Esta consiste na análise da possibilidade de arrancamento das inclusões da zona passiva e de ruptura da inclusão na seção de máxima solicitação (coincidente com o plano de ruptura), Figura 2.1.

FIGURA 2.1 – Maciço reforçado em 2 zonas, ativa e passiva

Na verificação da estabilidade interna, faz-se a comparação da solicitação esperada em cada inclusão com a resistência à tração de projeto do geossintético. Na adoção desta resistência, considera-se o efeito da fluência, sendo possível duas abordagens distintas:

- a resistência a curto prazo (obtida em ensaios rápidos de tração) é minorada por fatores de redução, conforme a expressão a seguir (KOERNER, 1998):

$$T_{adm} = T_{ult} / FR_{dj} \times FR_{fl} \times FR_{dq} \times FR_{db} \quad (2.1)$$

Sendo:

T_{adm} – Resistência à tração admissível do geotêxtil;

T_{ult} – Resistência à tração última do geotêxtil (de curto prazo);

FR_{di} – Fator de redução devido a danos de instalação;

FR_{fl} – Fator de redução devido à fluência;

FR_{dq} – Fator de redução devido à degradação química;

FR_{db} – Fator de redução devido à degradação biológica.

O fator de redução devido à fluência é a relação entre a carga de ruptura de curto prazo e a carga que leva o material à ruptura por fluência (ABRAMENTO, 1995).

A carga de ruptura por fluência pode ser obtida através de resultados de vários ensaios de fluência, submetidos a cargas distintas, nos quais se registram os tempos necessários para que os corpos de prova atinjam a ruptura. Constrói-se uma curva com os valores de tempo e carga de ruptura para cada ensaio (GREENWOOD, 1998). Geralmente, estes pontos apresentam-se relativamente alinhados (MÜLLER-ROCHHOLZ, 1998), o que permite extrapolar a reta obtida experimentalmente para se obter a resistência à tração disponível pelo geossintético ao final da vida útil da obra. Na prática, freqüentemente, não há resultados de ensaios de fluência disponíveis. Para se definir a resistência à tração do geossintético, adotam-se, então, fatores de redução, para a resistência à tração de curto prazo, indicados pela literatura. Isso torna o procedimento conservador na maioria dos casos. Pode-se ver, na Tabela 2.1, a seguir, as recomendações de alguns autores, compiladas por KOERNER (1998).

TABELA 2.1 - Fatores de redução da resistência à tração por efeito da fluência (KOERNER, 1998)

Autor	Den Hoedt	Lawson	Task Force #27	Koerner
Matéria Prima	(1986)	(1986)	(1991)	(1998)
Polipropileno (PP)	4,0	2,5 a 5,0	5,0	3,0 a 4,0
Polietileno (PE)	4,0	2,5 a 5,0	5,0	3,0 a 4,0
Poliamida (PA)	2,5	1,5 a 2,5	2,9	2,0 a 2,5
Poliéster (PET)	2,0	1,5 a 2,5	2,5	2,0 a 2,5

O procedimento ora descrito, faz que, no dimensionamento de obras em SRG, só se considere a possibilidade de ruptura. Embora as questões relativas às deformações sejam de extrema relevância, não são consideradas adequadamente nos projetos por falta de dados relativos aos ensaios de fluência.

- A norma inglesa – BS 8006 (1995) contempla uma concepção alternativa para a obtenção da resistência à tração de projeto, nos casos de obras de SRG, que é adotada por JEWELL (1996) e PALMEIRA (1999). Este procedimento permite também considerar aspectos relativos às deformações. A expressão utilizada é mostrada a seguir:

$$T_{\text{proj}} = T / FR_{\text{dm}} \times FR_{\text{amb}} \times f_m \quad (2.2)$$

Sendo:

T_{proj} – Resistência à tração de projeto do geotêxtil;

FR_{dm} – Fator de redução devido aos danos mecânicos de instalação;

FR_{amb} – Fator de redução devido aos danos ambientais;

f_m – Fator devido às incertezas de processos como extrapolação de resultados de ensaios, dispersão dos mesmos, problemas de fabricação dos geossintéticos, etc..

T – Existem duas considerações possíveis para este fator:

1º - Critério de ruptura : $T = T_{\text{ref}}$ – Resistência à tração de referência do geotêxtil ao final da vida útil da obra, obtida de curvas de ruptura por fluência.

2º - Critério de utilização : Em alguns tipos de obra, é necessário limitar a deformação, principalmente quando se empregam inclusões extensíveis, caso dos geossintéticos, de um modo geral. Então:

$T = T(\epsilon, t, \theta)$ – Resistência à tração para uma deformação ϵ , em um tempo t a uma temperatura θ , obtida de curva isócrona para o tempo específico e na temperatura θ (Figura 2.2).

FIGURA 2.2 – Obtenção da resistência à tração de projeto para geotêxteis através da isócrona

A Figura 2.2 apresenta duas curvas. Da primeira se obtém a resistência à tração máxima do geossintético (T_{max}), conseguida em ensaios rápidos de tração. Da segunda se obtém a resistência à tração para uma deformação específica de projeto ($T(\epsilon, t, \theta)$). Esta última curva é denominada isócrona e também caracteriza um comportamento carga *versus* deformação do reforço. Ela, porém, contempla uma informação adicional, qual seja, a redução da rigidez devido à atuação do carregamento mecânico ao longo de um determinado tempo (a vida útil da obra, por exemplo), ou seja, o fenômeno da fluência.

Em casos gerais, basta que se adote a menor das resistências à tração, T_{ref} ou $T(\epsilon, t, \theta)$.

O segundo procedimento exposto é mais adequado que o primeiro, porém, para sua aplicação, é necessário que a fluência do geotêxtil a ser utilizado esteja bem caracterizada e representada através das curvas de ruptura por fluência e isócronas.

2.2 Fluência em geotêxteis

2.2.1 O fenômeno da fluência

Define-se fluência como o fenômeno físico pelo qual um material se deforma sob ação de um carregamento constante (KOERNER, 1998). O fenômeno é dependente do tempo e da natureza elastoviscoplastica do material (MSOUTI *et al.*, 1997).

A fluência ocorre devido ao deslizamento das cadeias poliméricas na região cristalina (ABRAMENTO, 1995). Portanto, o grau de fluência está diretamente relacionado com a cristalinidade do material. Existem outros fatores que também interferem a fluência das mantas geossintéticas, tais como a sua estrutura, o tipo de ligação entre seus elementos, entre outros, o que torna o fenômeno mais complexo do que quando ocorre nas fibras isoladas.

Um geotêxtil, mesmo carregado sob tensões inferiores à tensão última obtida em ensaios de tração, pode atingir a ruptura (VAN ZANTEN, 1986). Isto ocorre porque sob a ação permanente de cargas e a atuação da fluência, o seu polímero constituinte pode apresentar diversas alterações físicas, como a quebra das ligações moleculares, ou seja, as cadeias moleculares atingem seu comprimento crítico ou ainda o peso molecular crítico, entre outras (JEWELL & GREENWOOD, 1988). Isto resulta em uma diminuição da resistência à tração. Este fenômeno é conhecido como fadiga estática do material (JEWELL, 1996).

2.2.2 O comportamento de fluência em geotêxteis

O estudo da fluência consiste na determinação de uma relação entre a deformação e o tempo (MSOUTI *et al.*, 1997), segundo uma função como:

$$\varepsilon=f(t) \tag{2.3}$$

Diversos autores (ex. ALLEN, 1991; ASHMAWY & BORDEAU, 1996; CAZZUFFI *et al.*, 1997; MSOUTI *et al.*, 1997) indicam que esta função é composta de três partes (Figura 2.3), relativas às diversas fases do fenômeno:

- Fluência primária : correspondente ao primeiro trecho da curva da Figura 2.3. Nele, a velocidade de deformação diminui rapidamente. O trecho apresenta-se linear quando plotado em escala logarítmica de tempo;
- Fluência secundária : correspondente ao segundo trecho da curva da Figura 2.3. As deformações ocorrem com taxa constante e o trecho é linear quando plotado em escala aritmética de tempo.
- Fluência terciária : correspondente ao terceiro trecho da curva da Figura 2.3. Caracteriza-se por uma velocidade crescente de deformação, culminando com a ruptura.

ALLEN (1991) relata que a fluência primária é função da estrutura do geotêxtil; já a secundária e a terciária são determinadas pelo tipo de polímero. É importante frisar que a terceira fase da fluência pode não ocorrer, é típica para o PP e o PE, não para o PET (MÜLLER-ROCHHOLZ & KOLSLOWSKI, 1996).

FIGURA 2.3 – a) Curva típica da deformação em função do tempo para geotêxteis – fluência. b) Taxas de deformação em função do tempo (CAZZUFFI *et al.*, 1997)

Pode-se deduzir da Figura 2.3 que a deformação devida à fluência é o somatório das deformações ocorridas em cada estágio. A deformação total na manta

será obtida acrescentando-se o efeito da fluência à deformação que ocorre instantaneamente devido ao carregamento, ou seja:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} \quad (2.4)$$

Sendo:

ε_0 – Deformação específica instantânea

ε_I – Deformação específica devida à fluência primária

ε_{II} – Deformação específica devida à fluência secundária

ε_{III} – Deformação específica devida à fluência terciária

A deformação instantânea ocorre assim que o geossintético é carregado. O alongamento é proporcional à carga e seu valor pode ser obtido a partir de curvas tensão *versus* deformação obtidas em ensaios de tração executados com elevadas velocidades de deformação, tipicamente 20mm/min (DEN HOEDT, 1986).

Cada fase da fluência apresenta uma característica (Figura 2.3). Na fluência primária as deformações crescem rapidamente, porém a taxa de deformação decresce. A segunda etapa da fluência caracteriza-se por apresentar uma taxa de deformação praticamente constante até atingir um valor mínimo, a partir do qual tem-se o início da fluência terciária, na qual a taxa de deformação cresce rapidamente até que o material atinge a ruptura.

Quanto à deformação por fluência, KOERNER *et al.* (1988) citam três procedimentos que têm sido utilizados para sua determinação:

- ensaios de laboratório : utilizados para registrar diretamente o comportamento de fluência dos geossintéticos. Apresentam como problema o longo tempo necessário para a realização e a necessidade de confinamento para a simulação da situação real no caso de geotêxteis não tecidos. Atualmente, a maioria dos estudos disponíveis provém de ensaios não confinados;
- projeção analítica : obtida através de modelos reológicos e empíricos. Ambos requerem dados de laboratório como parâmetros iniciais. Como no item anterior,

idealmente as mantas não tecidas deveriam ser confinadas por solo ou ter suas estirções restringidas;

- acompanhamento do desempenho de obras em solo reforçados. Resultados obtidos de obras instrumentadas têm mostrado que a fluência medida é quase sempre inferior à estimada. É importante notar que as estimativas de deslocamento vêm sendo feitas com base em ensaios de fluência não confinados.

2.2.2.1 Rigidez a longo prazo dos geotêxteis – Curvas isócronas

O fenômeno da fluência pode também ser entendido como uma redução na rigidez do material ao longo do tempo. Isso pode ser representado pelas curvas isócronas, que relacionam a carga de tração aplicada com a deformação para um certo tempo (PALMEIRA, 1999). Através desta curva é possível observar o quanto o reforço deve deformar no período compreendido entre o final da construção e o final da vida útil da obra de solo reforçado, ou ainda, quando deverá ser atingida a deformação máxima admissível (JEWELL, 1996).

A obtenção de uma curva isócrona está representada na Figura 2.4. Pode-se perceber que a obtenção de uma isócrona envolve o conhecimento de algumas curvas de fluência. Ao se fixar um tempo define-se uma isócrona que é obtida de pares de pontos de cada uma das curvas de fluência disponíveis (deformação *versus* carga aplicada).

FIGURA 2.4 – Obtenção das curvas isócronas

Alguns autores sugerem a possibilidade, através das isócronas, de se proceder à análise do equilíbrio das estruturas de solo reforçado através da compatibilidade de deformações (JONES, 1994; JEWELL, 1996; PALMEIRA, 1999).

A análise é feita através das curvas tensão *versus* deformação do solo e da curva isócrona, obtida para vida útil e temperatura de projeto, uma vez que esta representa o comportamento mecânico do geotêxtil ao final da obra. Da Figura 2.5, a seguir, pode-se visualizar que a compatibilidade ocorre quando as curvas se interceptam, isto é, as deformações do solo e das inclusões se igualam. Esta deformação final da obra deve obedecer ao estado limite de serviço.

FIGURA 2.5 – Análise de equilíbrio de um maciço reforçado pela compatibilidade de deformação solo-geotêxtil.

Percebe-se que a curva isócrona é fundamental para projetos de SRG, uma vez que a partir dela pode se verificar a estabilidade de uma obra no que diz respeito ao estado limite de serviço, critério este que muitas vezes comanda o projeto. Também, caso não se disponha das curvas de ruptura por fluência, a resistência à tração de projeto pode ser obtida através das isócronas, principalmente em obras reforçadas por inclusões extensíveis, uma vez que a deformação é o critério predominante.

2.2.3 Ruptura por fluência em geotêxteis

Como mencionado, a resistência à tração de longo prazo dos geotêxteis é afetada, pois devido à fluência ocorre a fadiga estática do material (DUVALL & EGAN, 1990).

Em função das alterações ocorridas nas moléculas dos materiais susceptíveis à fluência, quando solicitados mecanicamente, a ruptura física pode ser atingida, mesmo sendo a solicitação inferior à resistência de curto prazo do material. A resistência à tração de longo prazo deve, portanto, ser caracterizada, uma vez que cada vez mais, obras de SRG apresentam elevados tempos de projeto.

Se a resistência a longo prazo é conhecida, obtém-se o tempo que o material leva para atingir a ruptura sob o carregamento constante. Esta definição é feita experimentalmente em ensaios muito similares aos de fluência. É possível obter ambas características a partir do mesmo ensaio, porém, as cargas convencionalmente utilizadas em ensaios de fluência levam o geotêxtil à ruptura em um tempo demasiadamente longo, além disto, são necessários pelo menos três corpos de prova para cada nível de carregamento em ensaios de ruptura por fluência, uma vez que estes resultados apresentam grande variabilidade (JEWELL & GREENWOOD, 1988).

2.2.3.1 Resistência a longo prazo dos geotêxteis - Curvas de ruptura por fluência

Normalmente os ensaios de ruptura por fluência são executados com CP's submetidos a carregamentos elevados, para que se obtenham rupturas em tempos relativamente curtos. Quando os valores da carga aplicada nestes ensaios são plotados em relação ao tempo de ruptura, em escala logarítmica, geralmente se obtém uma reta. Pode-se, então, extrapolar esta reta, obtendo-se o tempo de ruptura para carregamentos mais baixos. Assim, é possível adotar a resistência à tração do geotêxtil referenciada à vida útil da obra (JEWELL, 1996; PALMEIRA 1999).

A Figura 2.6 representa esquematicamente uma curva de ruptura por fluência, onde o segmento tracejado indica a extrapolação de onde foi possível se obter a resistência à tração de referência para um geossintético ao final de sua vida útil.

FIGURA 2.6 – Obtenção da resistência à tração de um geotêxtil a partir da curva de ruptura por fluência.

2.2.4 Fatores intervenientes na fluência de geotêxteis

Vários fatores intervêm na fluência em geotêxteis, como (DEN HOEDT, 1986; VAN ZANTEN, 1986; CAZZUFI, 1997):

- polímero constituinte da manta;
- tipo de geotêxtil quanto à forma de fabricação;
- nível de carregamento aplicado;
- temperatura;
- tempo.

Em geotêxteis não tecidos deve-se considerar também o confinamento (McGOWN *et al.*, 1982; BALLEGEER & WU, 1993; TUPA & PALMEIRA, 1995; COSTA, 1999).

Os três últimos itens são fatores externos (carga, temperatura e tempo), determinados pelo tipo de projeto, local da obra e método construtivo (DEN HOEDT, 1986).

A seguir, descreve-se a influência de cada fator isoladamente.

2.2.4.1 Polímero

Na produção de geotêxteis têm sido utilizados os polímeros termoplásticos, que são aqueles que podem ser remoldados, quando aquecidos, sem entrar em processo de degradação. As matérias-primas utilizadas são o Polietileno (PE), o Polipropileno (PP), o Poliéster (PET) e ainda a Poliamida (PA). Estes polímeros são semicristalinos, ou seja, apresentam áreas onde as moléculas encontram-se orientadas, regiões cristalinas, e outras onde as moléculas permanecem dispersas, regiões amorfas (FELDMAN, 1989). Quanto mais cristalino é o polímero, maior é sua resistência mecânica mas, em contrapartida, mais susceptível à fluência (DEN HOEDT, 1988; KOERNER, 1998).

Um outro fator importante na susceptibilidade à fluência é a temperatura de transição vítrea (T_g), que é aquela em que há mudança de estado físico, sólido, para um outro, conhecido como de mobilidade, e vice versa. Abaixo desta temperatura, as moléculas das regiões amorfas comportam-se como se estivessem congeladas, isto é, têm seus movimentos restritos (FELDMAN, 1989). Um geotêxtil constituído por um polímero que, à temperatura ambiente, está acima de sua T_g é mais susceptível à fluência do que outro cujo polímero está abaixo da T_g .

Os geotêxteis brasileiros são produzidos, até o presente momento, unicamente a partir de PP e PET. O PP tem boa resistência mecânica, porém a sua T_g é da ordem de -15 a -10°C e seu grau de cristalinidade é, em média, de 65%. Portanto, o PP é altamente susceptível à fluência. O PET, por sua vez, tem a T_g de aproximadamente 75°C e o grau de cristalinidade em torno de 35%. Isso significa que à temperatura ambiente, deve apresentar baixa fluência. Polímeros como a poliamida (PA) e o polietileno (PE) têm sido utilizados, em menor grau, na fabricação de geotêxteis. A PA apresenta T_g variando de 30 a 60°C e sua cristalinidade pode chegar a 60%. O PE pode apresentar duas formas: o polietileno de alta densidade (PEAD) e o polietileno de baixa densidade (PEBD). Ambos apresentam T_g da ordem de -100°C e suas cristalinidades são de aproximadamente de 70% e 45%, respectivamente (COOKE & REBENFELD, 1988; HORROCKS & D'SOUZA, 1992; HOLLAWAY, 1993).

A influência que o tipo de polímero exerce sobre a fluência de geotêxteis pode ser vista, por exemplo, nos ensaios apresentados por VAN ZANTEN (1986),

Figuras 2.8 a 2.10. Este autor utilizou em seus testes apenas os elementos lineares que compõem as mantas, por considerar que o comportamento destes é apenas influenciado pelo tipo de polímero, visto que as demais condições de ensaio eram controladas. A fluência em fibras isoladas, porém, subestima a observada nos geotêxteis.

FIGURA 2.7 – Ensaio de fluência em elementos lineares dos polímeros PE, PP, PET e PA a 60% da resistência última. (VAN ZANTEN, 1986).

FIGURA 2.8 – Ensaio de fluência em elementos lineares dos polímeros PE, PP, PET e PA a 20% da resistência última. (VAN ZANTEN, 1986).

As Figuras 2.7 e 2.8 relacionam a deformação sofrida pelo geotêxtil ao longo do tempo para cargas equivalentes a 60 e 20% da resistência última, respectivamente. Percebe-se que para carga equivalente a 60%, o PET apresenta relação linear entre deformação e o logaritmo do tempo. O PP e PA, por sua vez, mostram ligeira curvatura, com concavidade voltada para cima, pouco antes da ruptura. O PE apresenta crescimento acentuado da deformação com o tempo, tendendo a um valor

assintótico prematuramente. Reduzindo-se o nível de carregamento o efeito é minimizado, porém ainda evidenciado, especialmente para o PP.

VAN ZANTEN (1986) destaca também a diferença de comportamento, quanto à deformação, entre PP e o PE, que se alongam muito mais sob carga constante do que quando submetidos a carregamentos rápidos por tração. Para o PET e a PA isso não acontece; a deformação que ocorre em ensaios rápidos de tração é considerada o limite máximo para o material.

As diferenças de comportamento encontradas para os diversos polímeros podem estar associadas às temperatura de transição vítrea e às estruturas das suas cadeias moleculares (VAN ZANTEN, 1986; DEN HOEDT, 1986; HORROCKS E D'SOUZA, 1992).

Ainda, dessas figuras, percebe-se que as menores deformações iniciais são apresentadas pelo PP, fato que se justifica pelo alto grau de cristalinidade que este polímero apresenta. A fluência, representada pela inclinação das suas curvas, é menos marcante no PET (curva de menor inclinação), cuja T_g é a mais alta e cujo grau de cristalinidade é o menor dentre os ensaiados.

Quanto à susceptibilidade dos polímeros à fluência, pode-se ordená-los, do menos ao mais susceptível : PET → PP → PE

2.2.4.2 Tipo de geotêxtil

Os geotêxteis diferenciam-se entre si basicamente por dois fatores: a matéria prima e o processo de fabricação. Este, JEWELL (1996) o divide em duas etapas: a confecção e a combinação dos elementos lineares. Cada detalhe destas etapas pode pesar, em maior ou menor grau, no comportamento quanto à fluência. Destaque deve ser dado ao tipo de geotêxtil obtido, tecido ou não tecido. Estes mudam fortemente seu comportamento quando confinados, pois são materiais compressíveis e ganham rigidez quando comprimidos, reduzindo assim a magnitude da fluência. Os tecidos não apresentam variação significativa da resposta à fluência quando em confinamento.

O modo de fabricação ou a estrutura do geotêxtil, segundo alguns autores (ex. MATICHARD *et al.*, 1990, LEVACHER *et al.* 1994 e MSOUTI *et al.*, 1997), não

condicionam o comportamento de fluência. Entretanto, SHERESTA & BELL (1982) afirmam serem os geotêxteis não tecidos mais susceptíveis à fluência do que os tecidos. Entre as mantas não tecidas, COSTA (1999) esclarece que, para um mesmo polímero, as formadas por filamentos contínuos têm maior tendência à fluência quando comparadas com as de fibras cortadas. COSTA (1999) também observou, ao ensaiar dois geotêxteis não tecidos de fibras curtas de PP, diferenças consideráveis de comportamento quanto a fluência.

2.2.4.3 Nível de carregamento

Resultados de ensaios apresentados por SHRESTHA & BELL (1982) demonstram a interferência do nível de carregamento nos alongamentos causados pela fluência em geotêxteis. Após serem ensaiados diversos tipos de geotêxtil, sob duas condições de carga, mostraram-se mais sensíveis a esta variável os geotêxteis não tecidos, e, dentre estes, os constituídos de PP.

MATICHARD *et al.* (1990) também ensaiaram diversos geotêxteis, e os seus resultados mais importantes são mostrados nas Figuras 2.9 e 2.10.

FIGURA 2.9 – Curvas de fluência para os geotêxteis não tecidos termoligados de filamento contínuo de PET e PP a 20°C, sob diferentes níveis de carregamento (L) (MATICHARD *et al.*, 1990).

FIGURA 2.10 – Curvas de fluência para o geotêxtil tecido de laminetes de PP a 20°C, sob dois níveis de carregamento (MATICHARD *et al.*, 1990).

A Figura 2.9 mostra que o geotêxtil não tecido termoligado de fibras contínuas, de PET, apresenta curvas de fluência semelhantes, independentemente do nível de carga aplicada. Isso não ocorre com o geotêxtil não tecido termoligado de fibras contínuas de PP, que é demasiadamente influenciado pelo carregamento. A Figura 2.10 apresenta resultados de ensaios de fluência executados em uma manta tecida de PP. Percebe-se que o comportamento deformação *versus* tempo é fortemente dependente do nível de carga aplicada.

Do exposto, percebe-se que o principal elemento, que determina o comportamento mecânico de um geotêxtil, é o polímero. MATICHARD *et al.* (1990) corroboram com esta idéia ao afirmarem que o carregamento tem forte influência sobre a resposta de fluência de mantas geossintéticas, que, no entanto, também depende do tipo de polímero de que são constituídas.

Quanto à dependência da fluência ao nível de carga, com base nos materiais ensaiados, apresentados nos parágrafos anteriores, constata-se que as mantas tecidas sofrem menos influência do que as não tecidas, provavelmente devido ao alinhamento dos membros longitudinais com as carga aplicadas. Os geotêxteis não tecidos, cujas fibras ou filamentos têm orientação aleatória, sofrem um alinhamento gradual com a direção da carga, quando solicitadas. Os geotêxteis de PET mostram-se menos sensíveis ao nível de carregamento em relação aos de PP, denotando a

importância que tem o tipo de polímero que os constitui. E, por último, os geotêxteis de estrutura formada por filamentos contínuos apresentam maior dependência em relação à carga do que os de fibras curtas. Uma possível causa disto seria a maior facilidade que este último tipo de estrutura tem de se alinhar com a direção de aplicação da carga.

2.2.4.4 Confinamento

O efeito do confinamento na fluência de geotêxteis não tecidos deve ser verificado, pois na maioria das aplicações esses produtos sofrem um confinamento do solo envolvente (BALLEGEER & WU, 1993). As comparações entre os resultados laboratoriais e as medições de campo têm mostrado que a fluência pode ser superestimada quando se adotam parâmetros de ensaios não confinados, principalmente em geotêxteis não tecidos.

Ensaio realizados por ALLEN (1991) mostram a redução da fluência com o confinamento. A principal contribuição do confinamento é restringir o movimento individual das fibras, evitando que elas se alinhem ao longo da direção da carga. Outros autores (ex.: JEWELL & GREENWOOD, 1988 e CAZZUFFI *et al.*, 1997) comentam que a mudança de comportamento provocado pelo enrijecimento do geotêxtil confinado é causada pelo impedimento da contração lateral ou estricção, que ocorre quando o geotêxtil é tracionado. Finalmente, a tensão aplicada à manta provoca um aumento do atrito entre as fibras e a impregnação de solo na matriz têxtil impossibilita o deslizamento das mesmas (COSTA, 1999).

Um equipamento pioneiro para o estudo do confinamento de geotêxteis em solo foi desenvolvido por McGOWN *et al.* (1982). Seus ensaios demonstraram a importância desta variável em geotêxteis não tecidos. A Figura 2.11 apresenta resultados obtidos para dois tipos de geotêxtil. O primeiro, (a), não tecido, termoligado de filamentos contínuos composto por 67% de PP e 33% de PE; e o segundo, (b), não tecido, agulhado de filamentos contínuos, 100% PET. Pode-se perceber que, quando confinados, há uma considerável redução na deformação inicial em ambos geotêxteis (a e b). Para o geotêxtil (a) a fluência foi praticamente

eliminada, e para o geotêxtil (b), mesmo sem confinamento, ela foi baixa, por ser composto por PET.

FIGURA 2.11 – Resultados de ensaios de fluência em (a) geotêxtil não tecido termoligado 67% PP e 33% PE e (b) geotêxtil não tecido agulhado 100% PET (McGOWN *et al.* 1982).

Pesquisas posteriores vieram contribuir para um melhor conhecimento da ação do confinamento em geotêxteis não tecidos. Dentre estes trabalhos, cita-se o de BALLEGEER & WU (1993), que executaram ensaios de tração em um equipamento concebido pelo segundo autor. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 2.12 a 2.14. Foi verificado que geotêxteis não tecidos agulhados de PET apresentam um substancial aumento de rigidez devido ao confinamento com baixas deformações. Acima de 5 a 10% de deformação, a curva de fluência torna-se paralela às de ensaios não confinados. Em geotêxteis não tecidos termoligados de PP, apenas sob deformações elevadas, há aumentos de rigidez e resistência.

FIGURA 2.12 – Ensaio não confinado x Ensaio confinado em geotêxtil não tecido de PET (BALLEGEER & WU, 1993).

FIGURA 2.13 – Ensaio não confinado x Ensaio confinado em geotêxtil não tecido de PP (BALLEGEER & WU, 1993).

FIGURA 2.14 – Ensaio não confinado x Ensaio confinado em geotêxtil tecido de PP (BALLEGEER & WU, 1993).

Para geotêxteis tecidos, os autores verificaram que a influência do confinamento é muito pequena.

TUPA & PALMEIRA (1995) também apresentam resultados de ensaios de tração confinada em geotêxteis do tipo não tecido, em solos finos. Seus resultados confirmam a tendência de alta sensibilidade ao confinamento dos geotêxteis não tecidos, como se pode perceber na Figura 2.15, que traz resultados de um geotêxtil não tecido agulhado de PET, submetido a diversas tensões confinantes. A Figura 2.16 mostra, para o mesmo ensaio, a variação na rigidez da manta com o confinamento.

FIGURA 2.15 – Curvas carga *versus* deformação para ensaios de tração em geotêxtil não tecido agulhado de PET, confinado em silte sob diversas tensões (TUPA & PALMEIRA, 1995).

FIGURA 2.16 – Variação na rigidez secante do geotêxtil em função da deformação e confinamento (TUPA & PALMEIRA, 1995).

Pode-se perceber, na Figura 2.16, que a maior influência do confinamento na rigidez do geotêxtil ocorre sob pequenas deformações e, ainda, que pressões de confinamento elevadas tendem a gerar menores aumentos na rigidez.

Em geral, pode-se dizer que geotêxteis tecidos são pouco influenciados pelo confinamento. Já os geotêxteis não tecidos mostram-se sensíveis a esta variável. Dentre estes, os ligados por agulhamento são os que mais ganham rigidez quando confinados, devido à sua estrutura compressível. Os geotêxteis termoligados só apresentam sinais de aumento de rigidez para deformações relativamente elevadas, pois, no processo de fabricação, a manta é comprimida para promover a ligação entre as fibras. Este efeito é permanente (BALLEGEER & WU, 1993).

Finalmente, vale ressaltar que há resultados de ensaios de geotêxteis não tecidos confinados em areia, que indicam reduções de 40 a 60% nas deformações devidas à fluência (ALLEN, 1991).

2.2.4.5 Temperatura

Há várias décadas, pesquisadores vêm utilizando a temperatura para acelerar alguns fenômenos viscosos e viscoelásticos em polímeros (THORNTON *et al.*, 1997). A variação da temperatura, portanto, altera a velocidade com que a fluência

dos geotêxteis se processa. Este fator passa a ser de grande importância em um país de dimensões continentais, como é o caso do Brasil, em que há diversos tipos climáticos, indo do temperado ao semi-árido (MOREIRA & PIRES NETO, 1998).

Em termos qualitativos, é lícito afirmar que um aumento de temperatura acelera o fenômeno da fluência em geotêxteis, como pode ser observado nos ensaios de MATICHARD *et al.* (1990) apresentados na Figura 2.17. As três curvas de fluência, obtidas sob mesmas condições de carregamento e temperaturas distintas, denotam o quanto a mudança de temperatura afeta o fenômeno. A 20°C, percebe-se apenas o primeiro estágio da fluência; já a 40°C, é nítida a predominância da fluência secundária e, por fim, a 60°C a instabilidade é atingida no início do ensaio.

FIGURA 2.17 – Curvas de fluência para geotêxtil de PP a 20, 40 e 60°C (MATICHARD *et al.*, 1990).

A dependência da temperatura está diretamente relacionada com o polímero que constitui a manta. Para geotêxteis fabricados a partir de PP e PE, que, à temperatura ambiente, apresentam-se acima de suas Tg's, a sensibilidade à temperatura é alta; já nos geotêxteis de PET, é bastante reduzida. Resultados de MÜLLER ROCCHOLZ & KIRSCHNER (1990) mostram que para temperaturas ambientais de 10°C a 30°C, comuns entre nós, o PET não sofre alterações de comportamento quanto à fluência. Nas poliolefinas (PP e PE), BUSH (1990) afirma ser a temperatura mais importante no trecho inicial da curva de fluência.

2.3 Ensaio de fluência em geotêxteis

A caracterização da fluência de geotêxteis é feita, geralmente, a partir de resultados de ensaios não confinados, que têm sido empregados com o intuito de incorporar aos resultados da caracterização o efeito da ação do solo sobre o geotêxtil.

2.3.1 Ensaios de fluência em geotêxteis não confinados

Os ensaios de fluência em geotêxteis não confinados são, até certo ponto, simples. Consistem em submeter o corpo de prova a um esforço de tração constante, medindo-se então os alongamentos que ocorrem com o passar do tempo. As dificuldades residem, como já citado, no tempo demasiadamente longo de ensaio e no controle do ambiente durante todo o período de ensaio.

A norma brasileira para ensaio de fluência em geotêxteis não confinados só foi aprovada recentemente pela comissão responsável. Até então, a prática tem sido a de se adotar normas de órgãos estrangeiros. A Tabela 2.2 destaca alguns tópicos relevantes de 3 normas, para efeito de comparação.

Em comum, as 3 normas apresentam recomendações para que os ensaios não sejam influenciados por fatores que possam afetar os resultados. Por exemplo, deve-se tomar cuidado para que não haja escorregamentos relativos entre a garra e o corpo de prova. A garra deve ser projetada de tal modo que não danifique o material a ser ensaiado, pois isso pode induzir a ruptura na extremidade do corpo de prova.

Alguns cuidados com o equipamento são necessários. O suporte deve ser rígido, para que não apresente deformações visíveis, e também isolado de vibrações, uma vez que estas podem aumentar sensivelmente as deformações no geotêxtil.

A carga de ensaio deve ser aplicada rápida e suavemente, e mantida constante durante todo ensaio.

TABELA 2.2: Comparação entre as normas para ensaios de fluência em geotêxteis não confinados.

		ISO 13431 (1998)	ASTM D5262 (1994)	BS 6906 Part. 5 (1991)
Nº. DE CP's		4	4	4
Dimensões do CP (altura x largura)		24cm x 20cm	20cm x 20cm	20 cm x 5 cm
Ambiente de ensaio		ISO 554 Condições do CP antes do ensaio: Até variação da massa < 0,25% entre leituras espaçadas de 2 h	Temp. = 21±2°C Umid. = 50 / 75% Condições do CP antes do ensaio: Até variação da massa < 0,1% entre leituras espaçadas de 2 h	Temp. = 20±2°C Umid. = 65±2% Condições do CP antes do ensaio: permanecer 48 h no ambiente.
Duração do ensaio		1.000 h	10.000 h	10.000 h
Medição das deformações	Local	2 linhas paralelas no sentido da largura ou 2 pontos no eixo central da altura. Pontos de leitura a pelo menos 2 cm da garra	---	Duas medições em lados opostos em relação ao eixo de simetria vertical, para compensação de possíveis distorções
	Precisão	0,1% do comprimento de medida	Preferencialmente extensômetro. Precisão de 0,003 mm	---
Cargas de ensaio		Adotar 4 entre: 5;10;20;30;40;50;60% da resistência à tração	20;30;40;60% da resistência à tração	10;30;40;60% da resistência à tração
Tempo das leituras		1;2;4;8;15;30;60 min 2;4;8;24 h 3;7;14;21;42 dias	1;2;6;10;30;60 min 2;5;10;30;100;200;500; 1.000h a cada 500h ate 10.000 h	4 leituras: Primeira 0,1h Entre 0,1 e 1ªh 1ª e 10h 10 e 100h 100 e 1.000h 1.000 e 10.000h

2.3.1.1 Equipamento básico

Os equipamentos utilizados para efetuar ensaios não confinados de fluência envolvem três partes distintas (COSTA, 1999):

- sistema de ancoragem;
- sistema de acompanhamento das deformações;
- sistema de aplicação da carga.

Um esquema ilustrando um equipamento típico pode ser visto na Figura 2.18. Ele consiste de um cavalete dotado de uma garra para a fixação dos corpos de prova e garra para a aplicação das cargas que, neste caso, são pesos mortos. Vêem-se, no esquema, extensômetros de ambos os lados da amostra para ajustar os alongamentos sob carga.

FIGURA 2.18 – Equipamento básico para ensaios não confinados de fluência (McGOWN *et al.*, 1986).

Variações do modelo básico são possíveis. Um exemplo pode ser a aplicação da carga através de braços de alavanca, diminuindo a quantidade de peso morto a ser utilizada. A principal vantagem de um sistema de carga como o ilustrado (peso morto suspenso diretamente na amostra) é que não há necessidade de manter um controle permanente para que o peso desejado seja realmente aplicado no corpo de prova ao longo de todo o tempo de ensaio.

2.3.1.2 Representações gráficas da fluência

A forma usual de apresentação dos resultados de ensaios de fluência é a plotagem da deformação(%) *versus* o tempo em escala logarítmica ou não. Segundo COSTA (1999), esta forma de tratamento de resultados permite uma visualização das magnitudes das deformações para cada carregamento de forma muito prática. O aspecto destas curvas pode ser visto na Figura 2.19.

FIGURA 2.19 – Aspecto de curvas tipo deformação total *versus* tempo para carregamentos distintos (McGOWN *et al.*, 1986).

Outra forma bastante útil de se apresentar os mesmos resultados são as isócronas. Essas curvas relacionam as deformações com os carregamentos para tempos iguais. A linha A da figura anterior fornece pares de valores carga *versus* deformação, para um tempo t definido, que permite o traçado de uma curva isócrona. Valores obtidos destas curvas são parâmetros importantes para projetos, pois se relacionam diretamente com a vida útil da obra (MURRAY & McGOWN, 1988). A Figura 2.20 representa esquematicamente algumas isócronas. É interessante salientar que um ensaio de fluência gera apenas um ponto de cada isócrona, pois é referente a apenas uma carga.

FIGURA 2.20 – Aspecto esquemático das curvas isócronas

Curvas que relacionam o logaritmo da taxa de deformação com a deformação total (%) são conhecidas como *Sherby-Dorn*. Elas permitem uma excelente visualização da proximidade da ruptura. Para carregamentos altos, elas apresentam concavidade para cima, cujos pontos de mínimo se alinham segundo uma reta vertical denominada limite de instabilidade. Esta linha define a deformação total para a qual se deflagra o processo de ruptura. Um exemplo está esquematizado na Figura 2.21.

FIGURA 2.21 – Curvas Sherby-Dorn esquemáticas

2.3.1.3 Resultados obtidos em pesquisas anteriores

COSTA (1999) executou testes de fluência não confinada em dois geotêxteis não tecidos agulhados de PET (geotêxtil A) e de PP (geotêxtil B). É importante frisar que o primeiro possuía filamentos contínuos, e o segundo era formado a partir de fibras curtas.

A Figura 2.22 representa a curva de fluência que COSTA (1999) obteve para o geotêxtil A submetido a uma carga equivalente a 60% de sua resistência à tração. As curvas para o geotêxtil B, para 3 níveis de carregamento (23%, 46% e 60%), estão apresentadas na Figura 2.23.

FIGURA 2.22 – Curva de fluência para o geotêxtil não tecido agulhado de PET com carga equivalente a 60% de sua resistência à tração (COSTA, 1999).

FIGURA 2.23 – Curvas de fluência para o geotêxtil não tecido agulhado de PP com carga equivalente a 23, 46 e 60% de sua resistência à tração (COSTA, 1999).

Comparando-se as curvas de fluência para ambos geotêxteis submetidos à carga de 60% de suas resistências à tração, percebe-se que:

- a deformação inicial do geotêxtil A (cerca de 30%) é significativamente menor que a do geotêxtil B (pouco mais de 40%);
- a deformação ao final do ensaio (8500 horas) para o geotêxtil A atingiu aproximadamente 43%, enquanto que, no ensaio de tração, ele rompeu com 54% de deformação. O geotêxtil B, após 9000 horas de ensaio, apresentou deformações superiores a 110%, enquanto que sua deformação na ruptura no ensaio de tração era de 88% apenas;
- a Figura 2.23 mostra que, para o geotêxtil B, o aumento da carga aplicada gera um aumento da intensidade de fluência (observado pela inclinação das curvas). Outro detalhe interessante é a proximidade das curvas para as cargas de 46% e 60% da resistência à tração. Isso provavelmente ocorreu devido à variabilidade de resistência do geotêxtil ensaiado. Tal fato é confirmado na Figura 2.24, também de COSTA (1999), em que três CP's do geotêxtil B foram carregados com 40% de suas resistências à tração e forneceram curvas de fluência.

FIGURA 2.24 - Curvas de fluência para o geotêxtil B, todas para o mesmo carregamento (40%), denotando a variabilidade do material (COSTA, 1999).

- a curva de fluência do geotêxtil B, carregado com 60% de sua resistência à tração, apresenta uma mudança de inclinação após transcorrido um certo tempo de ensaio.

Esses resultados de COSTA (1999) confirmam que o polímero exerce forte atuação sobre a fluência de geotêxteis, sendo o PP mais susceptível que o PET. Os resultados realçam também a variabilidade na resistência à tração, que influi na magnitude da fluência observada. Quanto às deformações apresentadas pelos materiais, confirmou-se que o geotêxtil B, de PP, deforma-se mais sob ação de cargas constantes do que em ensaios rápidos de tração. Isso não ocorre para o PET.

Algumas conclusões interessantes foram obtidas por MÜLLER-ROCHHOLZ & KIRSCHNER (1990), que ensaiaram geotêxteis não tecidos sob situação diferenciadas de carregamento e temperatura. Como as leituras de deformações foram feitas em várias seções ao longo da altura do CP, pode-se perceber que havia comportamento diferenciado nos diversos locais de leitura, resultado de concentrações de tensão. Os autores associaram este comportamento ao processo aleatório de fabricação dos geotêxteis não tecidos, o que lhe confere um considerável variabilidade.

2.3.2 Ensaio de fluência em geotêxteis confinados

Devido às diferenças encontradas em maciços de solo reforçado entre as deformações previstas e medidas (sendo estas inferiores na maioria dos casos), inferiu-se que o confinamento poderia ter efeitos benéficos sobre as mantas de geotêxteis. Os ensaios confinados de fluência surgiram da necessidade de se verificar as mudanças nas propriedades mecânicas das mantas em decorrência de estarem confinadas pelo solo circundante.

Não existe, em nível mundial, uma norma que oriente a execução de ensaios confinados de fluência, porém muitos pesquisadores vêm desenvolvendo equipamentos e procedimentos de ensaio para tal fim. Alguns destes equipamentos serão descritos.

2.3.2.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos de ensaios de fluência confinada são similares aos não confinados, à exceção do sistema de aplicação do confinamento (COSTA, 1999).

McGOWN *et al.* (1982) desenvolveram o primeiro equipamento para ensaios de fluência confinada, que serviu de base para o desenvolvimento de muitos outros construídos depois. Um esquema do ensaio pode ser visto na Figura 2.25. Nele, o sistema de confinamento é constituído por duas caixas metálicas, nas quais é inserida uma membrana de borracha que, ao ser inflada, pressiona o solo que é colocado entre ela e o corpo de prova de geotêxtil.

FIGURA 2.25 – Esquema do equipamento de ensaio confinado de fluência de McGOWN *et al.* (1982).

Alguns problemas encontrados no equipamento são:

- perfuração da membrana de borracha pelos grãos de solo. A solução dada ao problema foi a inserção de uma placa de borracha rígida entre a membrana e o solo;
- transferência da carga aplicada do geotêxtil para o solo devido às forças de atrito do sistema. Para minimizar esse efeito, inserem-se membranas de borracha impregnadas de graxa de silicone entre a borracha rígida e o solo, a fim de reduzir o atrito entre eles. Ainda assim, é aconselhável a inserção de células de carga, a fim de verificar a transferência de carga ocorrida;
- manutenção do contato entre o solo e o geotêxtil ao longo do ensaio.

COSTA (1999) realça a dificuldade de montagem deste ensaio, em especial a preparação do solo, no caso de necessitar de compactação.

Uma visão interessante a respeito dos ensaios confinados de fluência é dada por WU (1991). Segundo este autor, o ensaio mede o comportamento de tração ou fluência através de dois mecanismos. O primeiro refere-se à resistência causada pela rigidez da manta, incrementada pelo confinamento; o segundo, é o da resistência de interface (atrito e/ou adesão) entre o geotêxtil e o solo confinante. A diferença de medição em relação aos ensaios não confinados não é apenas relativa ao confinamento mas também às forças de interface que não estão presentes nesses.

A resistência de interface é mobilizada quando há uma tendência de movimento relativo (deslizamento) entre o geotêxtil e o solo confinante. Para que isso ocorra, a rigidez por confinamento deve ser maior que a resistência de interface. WU (1991) verificou, porém, a partir de observações do comportamento de diversos taludes e muros de contenção em solo reforçado, que, na grande maioria dos casos, até próximo à ruptura, o que ocorre é a deformação do geotêxtil conjuntamente com o solo que o envolve e não um deslizamento.

Do ponto de vista de projeto, a adoção de parâmetros obtidos nestes ensaios pode ser desfavorável à segurança, pois a solicitação no reforço é minimizada, reduzindo-se assim também o fenômeno da fluência.

WU (1991) classificou os ensaios de fluência confinada realizados com desenvolvimento de resistência de interface, de ensaios-modelo, pois neles ocorre *variação no campo de tensões instalado, e propôs um equipamento para a execução de ensaios-elemento de fluência confinada, para a obtenção de parâmetros inerentes ao geotêxtil.*

O equipamento de WU (1991) consiste em duas garras metálicas, ajustadas no interior de uma câmara de pressão, similar à câmara de ensaios triaxiais. Uma das garras é acoplada ao mecanismo de carregamento e a outra, à parte inferior da câmara (Figura 2.26).

FIGURA 2.26 – Equipamento para ensaios confinados, modificado do ensaio triaxial convencional em solo (WU, 1991).

O geotêxtil é posicionado verticalmente no interior de um corpo de prova cilíndrico de solo envolto por uma membrana de borracha. As extremidades do geotêxtil, salientes ao solo e reforçadas com resina, são fixadas às garras de tração.

Aplica-se uma tensão de confinamento na câmara e traciona-se então o geotêxtil.

O que o torna um ensaio-elemento, segundo WU (1991), é o fato de serem as deformações do geotêxtil iguais às do solo durante todo o tempo de ensaio. Portanto, não há variação no campo de tensões instalado. O que se mede são apenas parâmetros relativos ao geotêxtil.

2.3.3 Ensaios acelerados não confinados de fluência

Como já citado anteriormente, os ensaios de fluência são demorados. Em obras cuja vida útil é de 100 anos, por exemplo, as informações de projeto deveriam ser obtidas em ensaios com duração de 10 anos, pelo menos, uma vez que existe uma recomendação aceita mundialmente de que a extrapolação da curva de fluência não deve exceder a um ciclo logarítmico (JEWELL & GREENWOOD, 1988).

O mercado dos geossintéticos é extremamente dinâmico e, em 10 anos, um material pode se tornar completamente obsoleto sob o ponto de vista de fabricação.

Assim, os novos materiais que surgem com frequência necessitam ser caracterizados de forma rápida e eficiente.

As normas técnicas indicam que os tempos devem atingir mil e dez mil horas, por exemplo (ISO 13431 e ASTM D5262, respectivamente). Ainda assim, tais ensaios são demasiadamente demorado, além da relativa dificuldade de sua execução, pois necessitam de controle de temperatura e de umidade do ambiente em que são executados, durante todo o ensaio.

Um recurso que permite suplantar o inconveniente do tempo em ensaios de fluência é a utilização de temperaturas elevadas durante a sua execução, associada à utilização de técnicas de superposição tempo-temperatura (STT) (ALEN, 1991).

Este recurso será detalhado a seguir.

2.3.3.1 Superposição tempo-temperatura (STT)

O princípio de superposição tempo-temperatura, ou simplesmente STT, apóia-se na observação de THORNTON *et al.* (1997) segundo a qual: “Os processos físicos causados por carregamentos mecânicos, que resultam em diversas deformações de interesse tecnológico, podem ser acelerados por temperaturas elevadas”. Isso significa que é possível prever o comportamento a longo prazo, por exemplo, da fluência em geotêxteis, através de ensaios realizados em temperaturas acima das convencionais (JEWELL, 1996).

Ferramentas analíticas auxiliam no tratamento dos resultados obtidos dos ensaios realizados em temperaturas elevadas, entre elas as equações de Arrhenius e de William Landel Ferry (WLF). Também alguns métodos práticos têm sido propostos e comparados a estas equações.

2.3.3.2 A equação de Arrhenius

A equação de Arrhenius foi proposta em meados do século XIX para elucidar a teoria cinética dos gases. Naquela época, já se sabia que as reações químicas se processavam mais rapidamente sob elevadas temperaturas, pois a taxa de reação é função das colisões efetivas entre as moléculas. Esta, por sua vez, depende do

número total de colisões, da fração de colisões com energia suficiente e, ainda, da fração de colisões que ocorrem em condições de orientação favorável. Com base nestas propostas, a equação de Arrhenius pode assumir a seguinte formulação (KOERNER *et al.* 1992):

$$R_r = A \cdot e^{-(E_{at} / RT)} \quad (2.5)$$

Sendo:

R_r – a taxa de ocorrência do fenômeno estudado;

A – a constante que envolve o número total de colisões e a orientação das mesmas;

E_{at} – a energia de ativação;

R – a constante universal dos gases;

T – temperatura absoluta.

A equação de Arrhenius retrata muito bem o comportamento dos gases. No caso de materiais no estado sólido, ela apresenta algumas limitações devido às dificuldades de determinação da energia de ativação. No caso dos materiais viscoelásticos, como é o caso dos geossintéticos, entretanto, as taxas de ocorrência dos fenômenos degradativos apresentam forte dependência da temperatura. Esta equação tem sido bastante utilizada (SHELTON & BRIGHT, 1993).

Uma das aplicações da equação de Arrhenius tem sido a obtenção das taxas de fluência de geotêxteis para tempos além dos ensaiados. A fórmula utilizada é a mesma já apresentada e, no lugar de R_r , utiliza-se a taxa de deformação por fluência (ϵ'). Neste caso, é interessante reorganizar a equação original relacionando duas taxas de deformação por fluência em duas temperaturas distintas, ou seja:

$$\ln (\epsilon'_1 / \epsilon'_2) = (E_{at} / R) \cdot [(1/T_2) - (1/T_1)] \quad (2.6)$$

Sendo:

$\dot{\epsilon}_1$ e $\dot{\epsilon}_2$ – as taxas de deformação por fluência nas temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente.

A dificuldade encontrada na aplicação do método de Arrhenius para se estudar a fluência reside na dificuldade de determinação da energia de ativação, uma vez que a taxa de deformação se altera constantemente durante o ensaio. A alternativa é realizar um ensaio de fluência em que se varie a temperatura algumas vezes. Tomam-se, então, as taxas de deformação imediatamente antes e após as mudanças de temperatura e, por meio da aplicação da equação 2.6, obtêm-se as energias de ativação para as temperaturas que serão utilizadas nos ensaios de fluência.

Teoricamente, este método é indicado para materiais constituídos por polímeros que, à temperatura ambiente, encontrem-se abaixo de suas T_g 's (THORNTON *et al.* 1997).

2.3.3.3 A equação William Landel Ferry (WLF)

Quando se fazem diversos ensaios de fluência, por exemplo, sob os mesmos níveis de tensão, porém em temperaturas distintas, é possível sobrepor as curvas resultantes através de translações horizontais. A temperatura da curva que permanece em sua posição original é denominada temperatura de referência e o quanto se transladam as demais curvas no eixo do tempo determina o fator de translação (a_t).

O fator de translação é função das temperaturas de referência e das de execução dos ensaios. Um modo empírico da obtenção deste fator é feito por meio da equação de Willian-Landel-Ferry (WLF) (equação 2.7).

$$\text{Log } a_t = -C_1 \cdot (T - T_0) / (C_2 + T_0 - T) \quad (2.7)$$

Sendo:

T – a temperatura de ensaio;

T_0 – a temperatura de referência;

C_1 e C_2 – as constantes.

As constantes C_1 e C_2 variam pouco com o tipo de polímero constituinte do geotêxtil. Como valores típicos, podem ser utilizados 17,4 e 51,6 para C_1 e C_2 , respectivamente. Estes números são relacionados à T_g como temperatura de referência (FARRAG, 1998).

Quando a temperatura de referência adotada não coincide com a T_g , pode-se utilizar a seguinte correção dos valores para C_1 e C_2 (TAKAKU, 1980):

$$C_1^g = C_1 \cdot C_2 / (C_2 + T_g - T_0) \quad (2.8)$$

$$C_2^g = (C_2 + T_g - T_0) \quad (2.9)$$

Sendo:

C_1^g e C_2^g – as constantes para temperatura de referência igual a T_g ;

C_1 e C_2 – as constantes para temperatura de referência adotada;

T_0 – a temperatura de referência adotada.

2.3.3.4 Ensaios acelerados não confinados de fluência – Tipo Convencional

Esta modalidade de ensaio exige os mesmos equipamentos dos ensaios não confinados convencionais, acrescentando-se apenas um ambiente onde a temperatura possa ser controlada sem interferir nos demais dispositivos utilizados. Exemplos do instrumental empregado podem ser vistos em FARRAG e SHIRAZI (1997), que desenvolveram uma espécie de forno para envolver apenas o CP ensaiado, como pode ser observado na Figura 2.27.

FIGURA 2.27 – Esquema do equipamento com forno acoplado para ensaios acelerados (FARRAG & SHIRAZI, 1998).

Baseados na aplicação direta do princípio da STT, BUSH (1990) e FARRAG & SHIRAZI (1997) utilizaram resultados de ensaios não confinados executados sob o mesmo nível de carregamento mas com temperaturas distintas, para obter a curva de fluência para uma temperatura de referência e tempos mais amplos do que os ensaiados.

Nesta proposta, os autores efetuaram graficamente o traslado das curvas no eixo do tempo (Figura 2.28).

FIGURA 2.28 – Esquema de translação gráfica baseado no princípio de STT (FARRAG, 1998).

Para um melhor entendimento do processo utilizado na obtenção da curva acelerada de fluência, alguns ensaios de FARRAG e SHIRAZI (1997) serão mostrados e discutidos. Neste estudo, foram utilizadas geogrelhas de polietileno de alta densidade (PEAD), sob carregamentos que variaram de 10 a 45% de sua resistência à tração. Nos ensaios acelerados, os intervalos de temperatura estiveram compreendido entre 24 e 72°C. Para a verificação da acurácia do método acelerado também foram feitos ensaios convencionais com 10.000 horas de duração.

A Figura 2.29 representa os resultados dos ensaios de fluência obtidos para a carga de 22 kN/m aplicada à geogrelha de PEAD, sob cinco condições de temperatura (24, 38, 49, 60 e 72°C.).

FIGURA 2.29 – Resultados de ensaios de fluência em geogrelha de PEAD em cinco condições de temperatura (FARRAG & SHIRAZI, 1997).

Pode-se inferir da Figura 2.29 que as curvas resultantes situam-se mais acima do gráfico quanto maior for a temperatura do ensaio. Observando-se o princípio da STT, é possível deslocar as curvas horizontalmente (na escala logarítmica do tempo) de modo que as mesmas se sobreponham. Para isto, deve ser escolhida uma temperatura de referência, e a curva obtida nesta deve permanecer em sua posição original. O resultado de tal operação é a curva acelerada de fluência, mostrada na Figura 2.30. Para ilustração, esta curva é comparada com a obtida experimentalmente em ensaio com duração de 10000 horas. Observa-se que ambas são praticamente coincidentes.

FIGURA 2.30 – Curva obtida dos ensaios acelerados da Figura 2.29 *versus* curva obtida em ensaio convencional em geogrelha de PEAD (FARRAG, 1998).

No entanto, para cargas mais elevadas, os resultados dos ensaios acelerados e convencionais divergiram consideravelmente, como pode ser visto na Figura 2.31. Nesta, os ensaios foram carregados com 28 kN/m, o que corresponde a uma carga equivalente a 40% da resistência à tração da geogrelha. Observa-se que a tendência de comportamento dos ensaios é bastante distinta.

FIGURA 2.31 – Ensaio acelerado x ensaio convencional, discrepância relacionada com o alto nível de carregamento aplicado (FARRAG, 1998)

Os resultados apresentados permitiram aos autores fazer algumas recomendações importantes. O método proposto mostrou-se válido para carregamentos de até 40% da carga de ruptura do material. Acima desta carga, não houve uma acurácia para a estimativa do comportamento de fluência da geogrelha de PEAD estudada. Além disto, as temperaturas utilizadas foram limitadas àquelas em que não ocorre a ruptura acelerada.

Quanto à obtenção gráfica dos fatores de translação, o processo mostrou-se satisfatório, como pode ser observado nas Figuras 2.32 e 2.33, onde estão plotados os fatores de translação em função da temperatura, obtidos analiticamente, pela equação WLF e pelo modo gráfico, respectivamente.

No entanto, deve-se considerar que neste método utilizam-se um corpo de prova para cada temperatura escolhida. Caso haja variabilidade de comportamento entre os vários CP's, o que de fato, freqüentemente ocorre, deve-se antever diferenças entre os resultados obtidos.

FIGURA 2.32 – Fatores de translação calculados pela equação WLF (FARRAG, 1998).

FIGURA 2.33 – Fatores de translação obtidos graficamente (FARRAG, 1998).

2.3.3.5 Ensaios acelerados não confinados de fluência – *Stepped Isothermal Method*

O método mais atraente é proposto por THORNTON *et al.* (1998) e denomina-se *Stepped Isothermal Method* ou, abreviadamente, SIM. Trata-se de um método poderoso que apresenta a vantagem da rápida obtenção da resposta de fluência, a exemplo do anterior. Por utilizar apenas um CP para a geração da curva de fluência acelerada, também elimina um problema comum à técnica convencional de STT, a incerteza do valor do fator de translação, devido à variabilidade das propriedades mecânicas dos geossintéticos.

Antes de abordar o SIM, no que diz respeito à forma de execução e obtenção da curva, é interessante conhecer o princípio de Boltzman, que foi um dos primeiros tratamentos matemáticos de fenômenos viscoelásticos. Este princípio refere-se ao comportamento de fluência de um corpo submetido a carregamentos mecânicos aplicados em tempos distintos. A Figura 2.34 representa o princípio de Boltzman e a partir dela pode-se concluir que:

- a resposta de fluência é função da história de cargas;
- cada passo (nova carga aplicada) é tratado com um evento independente;
- a resposta total de fluência é a soma das respostas individuais de cada evento independente.

FIGURA 2.34 – Princípio da superposição de Boltzman para materiais viscoelásticos (THORNTON *et al.*, 1998).

A técnica do SIM é semelhante ao princípio de Boltzman, porém o que se altera é a temperatura do ensaio e não o carregamento aplicado.

O ensaio SIM inicia-se como um ensaio convencional na temperatura de referência, e assim permanece durante um tempo preestabelecido. Ao final desse passo, procede-se à mudança de temperatura, transição esta que deve ser relativamente rápida e não muito ampla, para que o estado físico do CP antes e depois da mudança seja praticamente o mesmo. Isso se repete em cada novo passo. O ensaio deve ser planejado para que se obtenha, ao final, a curva para o tempo

esperado. Isso significa que o tempo de cada passo e o incremento de temperatura devem ser cuidadosamente planejados (THORNTON, 1998).

Os procedimentos para a obtenção da curva de fluência pelo método SIM são descritos a seguir (THORNTON *et al.*, 1998):

- 1º.Passo: Plotam-se as deformações por fluência em função do tempo, em escala normal, para cada temperatura utilizada, isto é, para a obtenção do tempo de início virtual dos estágios;

FIGURA 2.35 – 1º passo do método SIM

- 2º.Passo: Transforma-se o eixo do tempo em escala logarítmica;

FIGURA 2.36 – 2º passo do método SIM

- 3º.Passo: Reorganiza-se a escala do tempo para cada segmento do ensaio (cada passo), de modo que cada um tenha seu tempo virtual de início. Isto é conseguido quando a inclinação do início do segmento é idêntica à do final do segmento anterior;

FIGURA 2.37 – 3º passo do método SIM.

- 4º.Passo: Eliminam-se as variações devidas ao efeito térmico através de uma translação vertical;
- 5º.Passo: Procede-se à translação horizontal de cada curva obtida no ensaio de modo que se obtenha a exata justaposição das curvas.

FIGURA 2.38 – 4º passo, obtenção da curva de fluência para longos períodos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos o instrumental utilizado para executar os ensaios de fluência, incluindo-se um método fotográfico para a leitura dos alongamentos, as características dos materiais ensaiados e os procedimentos de preparação das amostras e execução dos ensaios.

3.1 Método de leitura dos alongamentos

A medição do alongamento dos geotêxteis em um ensaio de fluência pode ser feita, por exemplo, com paquímetros. Neste caso, é inevitável o contato humano com o CP carregado. É possível também utilizar instrumentação eletrônica, que minimiza o contato e, portanto, as possibilidades de erro de leitura. Em ambos os casos, porém, é necessário garantir que não haja o escorregamento entre o CP e a garra. Para reduzir os cuidados e as preocupações excessivas com estes dois fatores, optou-se pela utilização de um método baseado em fotografias digitais.

Para a obtenção da medida dos alongamentos, visando obter uma forma prática e simples, adaptou-se um método fotográfico descrito por BUENO (1987).

O princípio básico deste processo é o conhecimento da posição real de pontos que possam determinar um plano (sistema de referência global). Na Figura 3.1, pode-se observar que este sistema de referência é fixo nos pendurais do ensaio, réguas metálicas servem de suporte para referências fixas convenientemente espaçadas. Um cuidado que deve ser tomado é que as faces das réguas estejam coplanares com a dos corpos de prova.

FIGURA 3.1 – Vista da régua metálica, base para a referência global, fixada no pendural de ensaio.

Com o sistema de referência global materializado, pode-se conhecer a posição real de qualquer ponto presente na imagem a ser trabalhada através de um fator escala. A Figura 3.2 mostra em detalhe um corpo de prova dotado de uma malha quadrada e de pontos específicos marcados com percevejos, escolhidos para registro dos deslocamentos.

FIGURA 3.2 – Marcas para leitura fixadas no CP.

Fotografias feitas ao longo do tempo com uma máquina digital modelo TOSHIBA PDR-M1 permitem acompanhar os deslocamentos do CP.

O tratamento da imagem é feito em um programa gráfico comercial, o AUTOCAD 14 da Autodesk, que permite incorporar a foto como imagem “*raster*”. Basta, então, digitalizar os pontos do sistema global de referência e as marcas de

leitura para realizar os registros de suas posições na fotografia. A Figura 3.3 mostra uma fotografia com os pontos de ensaio digitalizados.

FIGURA 3.3 – Imagem do início de um ensaio de fluência com os pontos de referência e de leitura digitalizados no AUTOCAD 14.

É necessário, então, um tratamento matemático para cálculo das distâncias entre os pontos de ensaio.

O modelo é muito simples, pois a obtenção das posições reais dos pontos a serem estudados é feita, a exemplo de Bueno (1987), através de 2 equações básicas:

$$X = A + Bx + Cy + Dxy + \dots \quad (3.1)$$

$$Y = A' + B'x + C'y + D'xy + \dots \quad (3.2)$$

Sendo:

X e Y: as coordenadas globais ou reais do ponto em questão;

x e y : as coordenadas locais (obtidas da foto) do ponto em questão;

A, A', B, B', C, C', D, D',...: as constantes de transformação de coordenadas do sistema.

Neste ponto, é importante destacar que o sistema, como definido acima, é cada foto obtida e tratada. Portanto, cada foto tem suas próprias constantes, obtidas

aplicando-se às equações 1 e 2 as coordenadas globais e locais dos pontos de referência.

Após a obtenção das constantes, tem-se equações capazes de transformar as posições de pontos na foto para as posições reais relativas ao sistema de coordenadas criado.

Uma propriedade interessante desta formulação é que ela corrige pequenas distorções do sistema. Com base nisto, procedeu-se a uma verificação da acurácia do método aplicado em função dos materiais adotados.

Para a obtenção desta acurácia, gerou-se uma matriz impressa com miras do mesmo tamanho que as utilizadas nos ensaios de fluência em geotêxteis e no mesmo número, cujas posições eram conhecidas. A Figura 3.4 ilustra a matriz gerada. O número de marcas referenciais foi quatro, capaz de “circunscrever” as marcas de medição das distâncias nos ensaios reais.

FIGURA 3.4 – Matriz gerada para calibração do método associado ao material utilizado.

A fotografia foi obtida com a câmara afastada cerca de 1 metro da matriz, distância também utilizada nos ensaios reais. As distâncias 1-3 e 2-4, que na matriz eram de 100 mm, foram calculadas através da aplicação rigorosa do método e os resultados encontram-se listados na Tabela 3.1:

TABELA 3.1 - Resultados da averiguação de precisão.

Pontos	Distância Real (mm)	Distância Calculada (mm)	Erro (%)
1-3	100,00	100,39	0,39
2-4	100,00	99,96	0,04

Percebe-se uma boa precisão do método associado aos materiais adotados (miras, tamanho das mesmas, distância ao ensaio). Destaca-se aqui que a precisão respeita a exigida pelas normas internacionais de fluência.

Uma grande vantagem na utilização do método fotográfico é a de evitar a preocupação com o deslizamento relativo entre a garra e o geotêxtil em ensaios de fluência ou com os cursos de extensômetros ou LVDT's.

Outra vantagem é o arquivamento, em meio magnético, das leituras, que podem ser tratadas em qualquer tempo.

3.2 Materiais utilizados

Foram utilizados geotêxteis de duas procedências, em três gramaturas distintas. As características de fabricação dos materiais são apresentadas na Tabela 3.2, a seguir:

TABELA 3.2 - Características de fabricação dos geotêxteis ensaiados.

Características de fabricação	Geotêxtil A	Geotêxtil B
Matéria-Prima	PP	PET
Tipo de fibras	Cortadas	Filamentos contínuos
Estrutura	Agulhada	Agulhada

A caracterização física e mecânica dos geotêxteis foi feita através de ensaios prescritos pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 3.3, que estabelece também uma nomenclatura para cada material, para facilitar a identificação.

TABELA 3.3 - Resultados da caracterização dos geotêxteis ensaiados.

Geotêxtil	Nomenclatura adotada	Gramatura nominal (g/m ²)	Ensaio de Gramatura (ABNT 12568, 1992)		Ensaio de Tração (ABNT 12824, 1993)			
			(g/m ²)	C.V (%)	Sentido 1		Sentido 2	
					(kN/m)	CV (%)	(kN/m)	CV (%)
A	GA3	300	320	7,26	13,37	3,38	19,71	8,10
	GA4	400	378	5,99	18,52	4,45	20,76	5,25
	GA5	500	525	4,37	22,98	10,91	31,80	4,68
B	GB3	300	312	7,82	19,90	3,75	17,39	13,95
	GB4	400	458	12,38	26,16	10,89	23,95	5,37
	GB5	500	529	9,86	32,34	8,47	28,33	8,44

CV: coeficiente de variação = relação entre o desvio-padrão e a média, expresso em porcentagem.

Observação: O sentido 1 refere-se à direção longitudinal e o 2, à direção transversal.

3.3 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos obedecendo-se às recomendações da ABNT (NBR 12593, 1992).

A dimensão entre as garras de fixação finais dos corpos de prova foi de 20 cm e coincidente com a direção de maior resistência da manta (transversal para o geotêxtil GA e longitudinal para o GB). Para obedecer a este padrão, os corpos de prova foram extraídos da amostra com 20 cm de largura e 50 cm de altura. A Figura 3.5, a seguir, mostra um corpo de prova típico, onde a grade indica a área de teste (20 cm x 20 cm) e as áreas extremas foram usadas para a fixação do CP às garras de tração.

FIGURA 3.5 – Corpo de prova do ensaio de fluência. A área central, quadriculada, é o espaço de prova, as extremidades são impregnadas de resina e solidarizadas às garras.

As dimensões da área de fixação do CP às garras permitiram envolver o elemento de garra em uma vez e meia. Esta área era impregnada com uma resina epoxídica (Araldite M e endurecedor HY 956, na proporção 5:1), enrolada na peça específica da garra, e o conjunto permanecia curando por 24 horas.

Adotou-se o padrão gradeado no espaço de prova para que se pudesse acompanhar qualitativamente o processo de deformação. A grade é formada por quadrados de 2,5 cm de lado.

3.4 Sistema de aplicação das cargas

O equipamento básico utilizado consiste em sistemas de ancoragem e de aplicação de cargas.

FIGURA 3.6 – Equipamento para ensaio de fluência desenvolvido por COSTA (1999) e utilizado nesta pesquisa.

O sistema de ancoragem é formado por pórticos metálicos, cuja função é a sustentação do ensaio via garra superior. O pórtico consiste em uma viga de 6 metros, dividida em vãos de 2 metros e com altura de 1,5 metros (COSTA, 1999). Dispõe-se de dois pórticos de configuração semelhante, cuja capacidade é de seis ensaios simultâneos, e de um menor, com capacidade para três ensaios simultâneos.

Para a execução dos ensaios acelerados, foi confeccionado um outro pórtico, com capacidade para apenas um ensaio, com a altura de 1,6m. As demais características dos pórticos dos ensaios convencionais foram mantidas.

As garras são peças fundamentais. Quando mal projetadas, ou mesmo, mal montadas, podem resultar no insucesso dos testes. A garra utilizada demonstrou ser eficiente. Ela consiste em um conjunto de quatro peças, duas menores, peças do tipo 1, (37 mm x 240 mm x 6,35 mm) e duas maiores, peças do tipo 2, (77 mm x 240 mm x 7,94 m), como pode ser observado na Figura 3.7. É na peça menor (tipo 1) que se fixa o geotêxtil às garras, conforme descrito no item 3.3. Assim que a cola seca, instalam-se as peças maiores para fechamento das garras.

FIGURA 3.7 – Garra utilizada nos ensaios de fluência (COSTA, 1999).

A garra superior é fixa ao pórtico por parafusos.

As cargas são aplicadas por pesos de aço, de forma cilíndrica, dispostos em um pendural também de aço. A Figura 3.8 mostra um conjunto de aplicação de carga montado e as partes do pendural: a haste e a base.

FIGURA 3.8 – Dispositivos de aplicação de carga do ensaio de fluência. À esquerda encontra-se o disco de sustentação. Ao centro, o tarugo, responsável pela ligação da carga à garra inferior. À direita pode-se observar o conjunto de carga montado.

Para a aplicação da carga no CP nos ensaios de menor carregamento, contou-se com o auxílio de um macaco hidráulico, tipo jacaré; nos ensaios com cargas elevadas (60% da resistência a tração do geotêxtil), optou-se pela utilização do equipamento conhecido como girafa, uma vez que as tentativas com o primeiro equipamento mostraram que as deformações iniciais do corpo de prova impediam

que ele fosse retirado de baixo do sistema de aplicação de cargas. Ambos equipamentos (jacaré e girafa) podem ser observados na Figura 3.9.

FIGURA 3.9 – Equipamentos utilizados para a aplicação do carregamento. À frente, o macaco hidráulico tipo “jacaré”. Atrás, o equipamento denominado “girafa”.

3.5 Ensaios convencionais não confinados de fluência

Os ensaios de fluência convencionais foram executados tomando-se por base a norma ISO 13431, uma vez que não há ainda norma brasileira para estes ensaios.

Nesta modalidade de ensaios, foram utilizados dois geotêxteis, denominados de GA e GB, em três gramaturas (300, 400 e 500 g/m²), conforme Tabela 3.3.

As cargas aplicadas nestes ensaios foram equivalentes a uma porcentagem da resistência à tração dos materiais ensaiados. Adotaram-se as porcentagens de 10, 20, 40 e 60%. Procurou-se, ao adotar estas cargas, obter uma boa distribuição para a construção da curvas isócronas. A carga de 10% é comumente encontrada em situações reais de obras de solo reforçado com geotêxtil (após aplicação de todos fatores de redução).

O laboratório onde se realizaram os ensaios dispõe de sala que atende aos requisitos de temperatura e umidade do ar, ou seja, temperatura no intervalo de $21 \pm 2^\circ \text{C}$ e a umidade de $65 \pm 2\%$.

3.5.1 Programação dos ensaios

A exigência da ISO 13431 quanto à duração dos ensaios é de 1000 horas. Embora alguns ensaios já tenham ultrapassado em muito esta marca, os resultados apresentados referem-se ao tempo máximo estabelecido pela ISO 13431.

A Tabela 3.4 resume os ensaios de fluência convencionais não confinados realizados, juntamente com o tempo dos resultados representados nesta pesquisa.

TABELA 3.4: Ensaios Convencionais Programados (*)

Geotêxtil	Carga Aplicada (% da Resistência a Tração)	Resultados reportados para a pesquisa (Horas)
GA3	10; 20; 40; 60	1008
GA4	10; 20; 40; 60	1008
GA5	10; 20; 40; 60	5050 a 7600
GB3	10; 20; 40; 60	1008
GB4	10; 20; 40; 60	1008
GB5	10; 20; 40; 60	5050 a 5550

(*)Observação: Os corpos de prova foram ensaiados no sentido mais resistente da manta.

3.5.2 Execução do ensaio

Após a preparação do CP, isto é, endurecida a resina solidarizando as extremidades da amostra às peças do tipo 1 da garra (Figura 3.7) e instaladas as peças do tipo 2 (da mesma Figura), prende-se o conjunto geotêxtil-garras em uma posição do pórtico de ensaio.

Devido à dificuldade de se aplicar uma pré-carga específica, considerou-se esta, em todos os ensaios, igual ao peso da garra inferior. Procurou-se proceder à

leitura da deformação devida à pré-carga no menor tempo possível. Cabe lembrar que as leituras deste ensaio são obtidas por fotografias, como já foi citado anteriormente.

Após posicionamento do CP no pórtico e a aplicação da pré-carga, o passo seguinte é a aplicação do carregamento. As normas que versam sobre o ensaio de fluência indicam que este deve ser instalado rapidamente, de forma suave, sem causar repique. Para isso, controlavam-se cuidadosamente os dispositivos dos equipamentos (jacaré e girafa) utilizados. Em geral, a carga era aplicada em aproximadamente 20 segundos. Após a carga aplicada em sua totalidade, acionava-se o cronômetro.

A partir do momento em que se iniciava a contagem do tempo, o ensaio consistia em acompanhar as deformações nos tempos predeterminados, quais sejam: 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 horas, 3, 7, 14, 21 e 42 dias. Para os ensaios que duraram mais que 1000 horas, as leituras, a partir do 42º. dia, foram feitas com intervalos de 21 dias.

3.6 Ensaio acelerados não confinados de fluência – *Stepped Isothermal Method* (SIM)

O uso de ensaios acelerados é muito recente e não há, portanto, normas específicas de execução. Em linhas gerais, adotaram-se recomendações da ISO 13431 e recomendações dos poucos artigos técnicos sobre o tema.

A grande diferença entre os ensaios acelerados e os convencionais, em termos de equipamento, é a necessidade de se ter um ambiente de temperatura controlável. Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma câmara para este fim.

3.6.1 A câmara de temperatura controlável

Estruturalmente, a câmara é uma grelha composta por cantoneiras de alumínio ligadas entre si por rebites. A Figura 3.10 permite visualizar o formato da estrutura:

FIGURA 3.10 – Croquis da câmara para a execução dos ensaios acelerados – dimensões em mm, sem escala – a) vista frontal; b) vista lateral; c) vista superior.

O fechamento da câmara, para fins de isolamento térmico, foi feito com placas de isopor especial, para forro. Constatou-se, na utilização da câmara, que não é necessária uma vedação extremamente rigorosa. Mesmo com a existência de algumas frestas, o comportamento do sistema mostrou-se muito eficiente.

No dimensionamento dos equipamentos necessários ao funcionamento térmico da câmara, foi levado em consideração que os ensaios acelerados seriam

feitos pelo método SIM, ou seja, altos gradientes de temperatura em tempos muito pequenos.

O cálculo da potência das resistências elétricas, necessárias para o funcionamento da câmara, é obtido pela seguinte equação:

$$W = Q / t \quad (3.1)$$

Sendo:

W – a potência necessária da resistência elétrica (kW);

Q – a quantidade de calor (kJ), valor obtido pela equação 3.2;

t – o tempo disponível para variação requerida de temperatura (s).

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Sendo:

m – a massa envolvida (kg);

c – o calor específico (kJ / kg • K) ;

ΔT – a variação requerida de temperatura (K).

É admissível para as características de desempenho do sistema que a mudança de temperatura entre dois patamares ocorra em até 1 ou 2 minutos. Porém, devido à inércia do sensor de temperatura e à eficiência do sistema (que era desconhecida), adotou-se, no cálculo, o valor de 10 segundos.

Quanto ao calor específico, optou-se por utilizar o do PP, uma vez que dos materiais utilizados, inclusive os das garras e réguas, este é o de maior resistência térmica. O valor de cálculo foi $c = 1,5 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}$ (MANO, 1991).

Estipulou-se uma variação de temperatura, entre os vários passos do ensaio de 10° C, pois é recomendável que esta variação não seja muito brusca. Na escala de temperatura em Kelvin, o valor numérico é o mesmo, ou seja, 10 K.

A massa aproximada, no interior da câmara, considerando-se o CP, as garras e os instrumentos necessários à condução do ensaio, e desprezando-se a massa de ar,

é de 10 kg. Chegou-se, então, ao valor da potência necessária para as resistências elétricas (15kW).

Os instrumentos necessários ao controle de temperatura no interior da caixa são resistências elétricas (15 kW), ventiladores internos e sensores de temperatura do tipo termopar “k”. Externamente, há um controlador de temperatura e uma chave contatora. Em termos de funcionamento, a câmara permite que os gradientes de temperatura se estabilizem entre 10 e 50 segundos, tempo que se verificou ser satisfatório para o propósito do ensaio.

A Figura 3.11, a seguir, apresenta o aspecto do sistema de ensaio acelerado. Pode-se perceber que a câmara se insere no pórtico, no seu interior se colocam apenas o CP e as régua de referência, além dos dispositivos funcionais como as resistências e os ventiladores.

FIGURA 3.11 – Equipamento para ensaio acelerado: pendural individual e câmara isolada com isopor para forro, dotada de resistências elétricas (não constam nesta foto os ventiladores, que fazem parte do sistema).

3.6.2 Roteiro do ensaio

Nos ensaios acelerados não confinados foram utilizados geotêxteis dos tipos GA e GB, somente na gramatura de 300 g/m².

Os níveis dos carregamentos aplicados foram os mesmos dos ensaios convencionais, ou seja, 10, 20, 40 e 60% da resistência à tração obtida conforme ABNT – NBR 12824 (1993), devido ao intuito de se verificar a aplicabilidade do método testado (SIM).

A parte inicial do ensaio acelerado é similar à do ensaio convencional, e compreende a preparação do CP, a sua instalação no pórtico, a leitura do comprimento da amostra relativo ao pré-carregamento e o carregamento propriamente dito. Apenas um detalhe deve ser adicionado a este roteiro: é necessário instalar um sensor de temperatura no CP. Nestes ensaios, isso foi feito com o auxílio de uma agulha de injeção. O cabo do sensor era enrolado ao redor da haste da agulha, que penetrava na manta. O instante da instalação ocorria entre a instalação do CP no pórtico e a leitura de pré-carga. Algumas vezes, a agulha se soltava durante o carregamento. Era necessário, então, recolocá-la na posição. Tal fato não implicou danos ao ensaio.

Neste trabalho, denominou-se como rampa uma variação da temperatura em função de um tempo, para a mudança dos estágios do ensaio acelerado pelo método SIM, e como patamar, o estágio sob temperatura constante do ensaio SIM.

No início da pesquisa, o intuito era ter ensaios com 5 patamares, com duas horas de duração cada. O ensaio se iniciaria à temperatura ambiente e, a cada 2 horas, se aumentaria a temperatura da câmara em 10°C, durante cerca de 1 minuto. Porém, durante o primeiro ensaio, decidiu-se que a primeira rampa, em vez de 10°C, tivesse o valor necessário para atingir 40°C. As demais seriam de 10°C.

O procedimento adotado foi:

- 1º. estágio: Patamar de 2 horas à temperatura ambiente. A temperatura ambiente esteve sempre entre 23 e 24°C;
- 2º. estágio: Rampa de 16 a 17°C por 1 minuto e patamar em 40°C, por 2 horas;
- 3º. estágio: Rampa de 10°C por 1 minuto e patamar em 50°C, por 2 horas;
- 4º. estágio: Rampa de 10°C por 1 minuto e patamar em 60°C, por 2 horas.

Os ensaios acelerados foram levados até 60°C, por ser esta temperatura um pouco inferior à Tg do PET. É indesejável que se atinja a temperatura de transição dos materiais ensaiados.

A programação de rampas e patamares foi mantida constante para todos os ensaios, para ser possível a análise do efeito do nível de carga e tipo de material na resposta do método SIM.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo está dividido em duas partes principais. Na primeira, faz-se a apresentação dos resultados dos ensaios de fluência não confinada, convencionais e acelerados. Na segunda, foi analisada, através dos ensaios convencionais, a interferência de parâmetros como o nível de carregamento, gramatura e tipo de geotêxtil na fluência destes geossintéticos. As isócronas preliminares para os materiais estudados são apresentadas, e, a seguir, é feita a análise de viabilidade da utilização do método SIM para a caracterização da fluência dos geotêxteis produzidos no Brasil.

4.1 Apresentação dos resultados

4.1.1 Ensaios convencionais

As Figuras 4.1 a 4.3 representam os resultados obtidos nos ensaios convencionais para os geotêxteis denominados GA. A Figura 4.1 mostra as curvas de fluência para a gramatura nominal de 300 g/m² nos quatro níveis de carregamento estudados. Similarmente, as Figuras 4.2 e 4.3 referem-se aos geotêxteis de gramatura de 400 e 500 g/m², respectivamente.

Os tempos de ensaio dos geotêxteis apontados nas Figuras 4.1 e 4.2 atingiram aproximadamente 1000 horas de duração; já os da Figura 4.3 alcançaram uma amplitude maior. Assim, as curvas para os carregamentos correspondentes a 10 e 20% da resistência à tração do geotêxtil GA5 apresentam resultados de aproximadamente 7600 horas de ensaio; já para 40% da resistência à tração, são

7100 horas de resultados, e para 60%, 5050 horas de resultado. Convém salientar que este último ensaio atingiu a ruptura com aproximadamente 5500 horas de ensaio.

FIGURA 4.1 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GA3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

FIGURA 4.2 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GA4, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

FIGURA 4.3 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GA5, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

As Figuras 4.4 a 4.6 apresentam os resultados obtidos nos ensaios convencionais para os geotêxteis, denominados GB, com gramatura nominal de 300 g/m², 400 g/m² e 500 g/m², respectivamente. A exemplo dos resultados já mostrados, estes estão agrupados de acordo com a gramatura nominal e cada gráfico apresenta quatro curvas, cada uma relativa a um nível de carregamento aplicado. Os tempos de ensaio dos geotêxteis de 300 e 400 g/m² atingiram duração de aproximadamente 1000 horas. As curvas para os carregamentos de 10 e 20% da resistência à tração do geotêxtil GA5 apresentam tempos de aproximadamente 5550 horas de ensaio; já para 40% e 60% da resistência à tração atingiram quase 5050 horas de resultados.

FIGURA 4.4 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GB3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

FIGURA 4.5 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GB4 sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

FIGURA 4.6 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Convencional, geotêxtil GB5, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

4.1.2 Ensaios acelerados

Os ensaios acelerados foram executados apenas nos geotêxteis GA e GB, com gramatura nominal de 300 g/m², sob os mesmos níveis de carga utilizados nos ensaios convencionais.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados obtidos nesses ensaios, segundo o método SIM, para o geotêxtil GA e GB, respectivamente. Nestes gráficos, as curvas de fluência já estão devidamente tratadas conforme descrito no item 3.6.3.

Um fato deve ser citado: o ensaio com o geotêxtil GB3, submetido a 60% da resistência à tração sofreu ruptura após transcorridas 4 horas e 48 minutos de ensaio (2 horas em 24°C, 2 horas em 40°C e 48 minutos em 50°C, sendo a última leitura de deformação feita a 30 minutos deste estágio).

Verificou-se, ainda, a ocorrência de contração térmica nos ensaios com o geotêxtil GB, constituído de PET. A contração térmica é uma redução do comprimento do CP que ocorre assim que a elevação de temperatura é instalada.

Constatou-se que este fenômeno é bastante influente no resultado final dos ensaios acelerados pelo método SIM.

A Figura 4.7 explicita a forma de compensação dos efeitos da contração térmica. Procurou-se acrescentar às deformações do estágio estudado a diferença entre a última deformação do estágio anterior e a primeira deformação do estágio em questão.

Percebeu-se que, para os geotêxteis de PET, o ideal é conhecer como a contração térmica se processa antes da realização dos ensaios, para assim proceder-se a correções mais realistas.

FIGURA 4.7 – Esquema da translação vertical utilizada para compensação da contração térmica no ensaio SIM.

FIGURA 4.8 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Acelerado, geotêxtil GA 3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

(1) Ensaio Interrompido por ruptura do corpo de prova

FIGURA 4.9 - Deformação total *versus* tempo – Ensaio Acelerado, geotêxtil GB3, sob carga equivalente a 10, 20, 40 e 60% da sua resistência à tração.

4.2 Análise dos resultados

4.2.1 Ensaaios convencionais

Como mencionado, a magnitude da fluência sofre interferência de fatores como o nível de carregamento, polímero constituinte e o tipo de estrutura do geotêxtil. A seguir, para clareza de entendimento, serão discutidos os efeitos de cada item supracitado.

4.2.1.1 Influência do nível de carregamento

Os resultados apresentados permitem que se perceba a influência do nível de carregamento sobre a magnitude da fluência (Figuras 4.1 a 4.6). Geralmente, quanto maior o nível de carga, maior é a intensidade da fluência, avaliada pelo coeficiente angular das equações das curvas ajustadas aos pontos experimentais (Tabela 4.1 e 4.2).

TABELA 4.1 - Coeficientes da regressão linear para os ensaios convencionais de fluência não confinada com o geotêxtil GA – Modelo: $y = a \ln(x) + b$:

Ensaio	a	b	R ²
GA3 10%	0,78	18,59	0,99
GA3 20%	0,84	25,98	0,99
GA3 40%	1,29	36,71	0,99
GA3 60%	1,64	45,68	0,98
	3,23		0,95
GA4 10%	0,89	20,35	0,99
GA4 20%	0,69	36,49	0,99
GA4 40%	1,13	39,97	0,97
GA4 60%	1,42	56,62	0,98
	2,46		0,98
GA5 10%	0,70	16,15	0,98
GA5 20%	0,61	29,95	0,98
GA5 40%	1,27	43,90	0,97
GA5 60%	1,99	54,535	0,99
	5,97		0,96

TABELA 4.2 - Coeficientes da regressão linear para os ensaios convencionais de fluência não confinada com o geotêxtil GB – Modelo: $y = a \ln(x) + b$:

Ensaio	a	b	R ²
GB3 10%	0,53	12,42	0,99
GB3 20%	0,56	22,04	0,98
GB3 40%	0,69	29,83	0,99
GB3 60%	1,38	48,01	0,98
GB4 10%	0,57	11,87	0,99
GB4 20%	0,50	22,00	0,98
GB4 40%	0,67	34,23	0,99
GB4 60%	1,40	58,28	0,97
GB5 10%	0,47	8,36	0,98
GB5 20%	0,52	16,10	0,99
GB5 40%	0,65	32,38	0,99
GB5 60%	0,85	41,21	0,99

Como pode ser visto nas tabelas citadas, há algumas exceções a esta regra geral, ou seja, valores de coeficiente angular decrescentes com o nível de carga. O exemplo em que a discrepância é mais acentuada ocorreu nos ensaios com o geotêxtil GA4. Nota-se que, para o nível de 10% da resistência à tração, a fluência, representada pelo coeficiente angular da reta, apresentou-se consideravelmente mais elevada do que para o nível de 20%. A provável causa destas discrepâncias é a variabilidade de gramatura apresentada pelo geotêxtil. Esta amostra, em particular, apresentou uma distribuição de gramatura muito irregular (C.V.=12,38%) e, como consequência provável, sua resistência à tração era altamente variável, ou seja, o nível de carga real aplicado no ensaio, cuja carga nominal era de 10%, era provavelmente superior ao valor considerado. O inverso pode ter ocorrido para o ensaio com nível de carga nominal de 20%. Houve outros casos em que a mesma situação ocorreu, porém, em intensidade bem menor (GA5 e GB4, também para os níveis de 10 e 20%).

Uma outra observação extremamente interessante, que confirma os resultados obtidos por COSTA (1999), é que para o geotêxtil GA, com qualquer gramatura, a fluência tem tendência de bilinearidade para o nível de carga de 60% da resistência à tração. A inflexão se dá em pequenas idades. No caso específico, isso ocorreu em 24 horas para o GA3 e em 72 horas para o GA4 e GA5. A provável explicação para esse fato é que a fluência secundária é predominante para este nível de carregamento (MIKI et al., 1990). Isso é um comportamento típico do geotêxtil de PP, como mostrado por COSTA (1999).

Uma outra forma utilizada para analisar o crescimento da fluência com o aumento do carregamento aplicado foi através da plotagem dos coeficientes de fluência médios, parâmetro relativo a inclinação das curvas de fluência (média dos coeficientes de fluência para materiais de mesma procedência sob carregamentos distintos), o que originou o gráfico apresentado na Figura 4.10.

FIGURA 4.10 – Crescimento dos coeficientes de fluência médios, para os geotêxteis GA e GB em função do carregamento aplicado.

Através da Figura 4.10, pode-se perceber que o coeficiente de fluência é sempre menor para o geotêxtil GB (PET e filamentos contínuos) do que para o geotêxtil GA (PP e fibras curtas). Porém a lei de crescimento em função da carga aplicada é muito semelhante para ambos os materiais. Ela é dada pela parcela exponencial das equações contidas no gráfico da Figura 4.10. É importante lembrar que a lei apresentada é válida para os materiais estudados e para os carregamentos aplicados nos ensaios (10 a 60% da resistência à tração dos materiais).

4.2.1.2 Influência do tipo de geotêxtil

Para estabelecer uma comparação entre os dois tipos de geotêxteis estudados, construíram-se gráficos contendo curvas similares de fluência. As Figuras de 4.11 a 4.14, a seguir, apresentam, por exemplo, resultados comparativos para os geotêxteis de 300g/m². Em geral, os demais resultados são similares a estes. Além disto, a gramatura de 300 g/m² foi a escolhida para estudar a fluência em ensaios com elevação de temperatura. A Tabela 4.3 sintetiza as deformações iniciais e os coeficientes angulares das equações (que representam a fluência) obtidas a partir dos pontos experimentais.

FIGURA 4.11 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 10% das suas resistências à tração.

FIGURA 4.12 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 20% das suas resistências à tração.

FIGURA 4.13 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 40% das suas resistências à tração.

FIGURA 4.14 – Comparação entre as curvas de fluência dos geotêxteis GA3 e GB3 quando submetidos a cargas equivalentes a 60% das suas resistências à tração.

TABELA 4.3 - Comparação entre as deformações iniciais e coeficientes de fluência das regressões lineares dos ensaios convencionais com os geotêxteis GA3 e GB3.

Ensaio	Deformação Inicial (%)		Coeficiente Angular (%/hora)	
	GA3	GB3	GA3	GB3
10%	15,30	10,31	0,78	0,53
20%	22,80	19,40	0,84	0,56
40%	32,33	27,21	1,29	0,69
60%	39,49	43,52	1,64	1,38
			3,23	

Para a maior parte dos casos estudados, a deformação inicial e a por fluência foram menores para os geotêxteis de PET (GB). Apenas para o carregamento de 60% da resistência à tração, o geotêxtil de PP apresentou menor deformação inicial. Neste geotêxtil, porém, a fluência ainda foi maior do que a do correspondente PET, sendo a

deformação total (inicial e por fluência) do PET foi superada em um tempo inferior a 100 horas.

Em termos percentuais, a deformação inicial foi de 15 a 30% menor para o geotêxtil GB em relação ao GA, até a carga equivalente a 40% de suas resistências à tração. Quanto ao carregamento de 60% de suas resistências à tração, o geotêxtil GA sofreu uma deformação inicial 10% menor do que o geotêxtil GB.

Para o coeficiente angular, parâmetro diretamente relacionado com a fluência, o geotêxtil GB apresentou valores de 30 a 45% menores do que os do geotêxtil GA, para as cargas equivalentes de até 40% da resistência à tração das mantas. Para os ensaios realizados com carga equivalente a 60% da resistência à tração dos geotêxteis, inicialmente o GB apresentou valor 16% inferior e, em relação ao segundo trecho da curva de fluência do geotêxtil GA, 60%.

4.2.1.3 Verificação da homogeneidade dos geotêxteis através das curvas de fluência

Para geotêxteis compostos da mesma matéria-prima e fabricados pelo mesmo processo, seria lógico esperar que as curvas de fluência fossem muito parecidas, uma vez que a espessura das mantas não parece interferir na eficiência do agulhamento. Esta expectativa de comportamento deveria ocorrer, porque a carga aplicada é estipulada como uma fração da resistência à tração da amostra. Idealmente, no presente caso, se os geotêxteis fossem absolutamente uniformes, os resultados deveriam dar origem a apenas quatro curvas, cada uma para um nível de tensão, independentemente da gramatura. No entanto, nem sempre ocorre a coincidência entre as curvas. Isto certamente é devido à variabilidade de gramatura e, portanto, de resistência, como atestam as Figuras 4.15 e 4.16.

FIGURA 4.15 – Curvas de fluência classificadas pelo nível de carregamento – GA.

FIGURA 4.16 – Curvas de fluência classificadas pelo nível de carregamento – GB.

Nas figuras acima, procurou-se identificar as áreas de domínio dos diversos níveis de carregamento. O que se pode notar da observação destes resultados é que para os geotêxteis GA, que se mostraram pouco homogêneos durante os ensaios, há uma certa dificuldade de se separar certos limites, e ocorrem, portanto, interseções entre eles. Nos geotêxteis GB, cujas amostras se mostraram mais homogêneas em geral, as áreas de domínio de cada um dos níveis de carregamento são nitidamente mais evidentes e percebe-se, também, que algumas curvas de fluência realmente se sobrepõem, como era de se esperar.

Estas figuras realçam a variabilidade dos geotêxteis em termos de resistência e, portanto, a dificuldade de comparação dos resultados obtidos.

4.2.1.4 Curvas Isócronas dos geotêxteis ensaiados

As curvas isócronas para os geotêxteis ensaiados constam das Figuras 4.17 a 4.22.

FIGURA 4.17 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GA3.

FIGURA 4.18 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GA4.

FIGURA 4.19 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GA5.

FIGURA 4.20 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GB3.

FIGURA 4.21 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GB4.

FIGURA 4.22 – Curvas Isócronas para o geotêxtil GB5.

As curvas isócronas das Figura 4.18, 4.20 e 4.21 parecem formar um “s” suave. Aparentemente, alguns CP’s utilizados para o ensaio de fluência têm resistência à tração que se afasta da média. Uma forma simples de superar a questão da heterogeneidade do material seria a realização de, pelo menos, 3 ensaios para cada nível de carga, obtendo-se, assim, curvas médias com formatos semelhantes aos das Figuras 4.17, 4.19 e 4.22. No entanto, as normas disponíveis não exigem a repetição dos ensaios.

Repetir ensaios com geotêxtil é muito importante, haja vista a variabilidade que apresentam, porém não é muito simples a repetição de ensaios que levam 1.000 ou 10.000 horas, fato que reforça a importância dos ensaios acelerados de fluência.

Pode-se perceber, nas isócronas apresentadas, a perda de rigidez que é causada pela permanência de uma carga por longa duração. São apresentadas, juntamente com as isócronas, as curvas aproximadas obtidas em ensaios rápidos de tração. Pode-se dizer que a rigidez apresentada por essas curvas é a máxima disponível pelo material. Observa-se que, para o ensaios do grupo GB5, as primeiras isócronas confundem-se com a curva tensão *versus* deformação instantânea do material. Isso ocorre porque este geotêxtil apresenta baixa perda de rigidez, uma vez que é constituído de PET. Essa é uma tendência que pode ser percebida nas isócronas dos demais ensaios. Os geotêxteis do grupo GB perdem menos rigidez devido à fluência do que os do grupo GA. Para avaliar e comparar quantitativamente esta perda, calculou-se o número de rigidez, definido como:

$$N = 0,5 \times T / \varepsilon_{60} - \varepsilon_{10} \text{ (kN/m)} \quad (4.1)$$

Sendo:

N – o número de rigidez da isócrona;

T – a resistência à tração do geotêxtil;

ε_{60} – a deformação específica a 60% de carregamento;

ε_{10} – a deformação específica a 10% de carregamento.

A Figura 4.23 apresenta a curva de perda de rigidez em função do tempo de carregamento para os ensaios dos grupos GA5 e GB5. Fica claro, através da inclinação das curvas, que os geotêxteis GB são menos afetados pela fluência no que diz respeito as suas rigidezes.

FIGURA 4.23 – Análise da perda de rigidez devido à fluência para os geotêxteis GA5 e GB5.

4.2.2 Ensaios acelerados não confinados de fluência – Método SIM

Os resultados dos ensaios acelerados, realizados com os geotêxteis GA, cujo polímero básico é o PP, Figura 4.8, mostram que com duração de 8 horas, seguindo as rampas e os patamares programados, forneceram curvas com tempos de reposta que excederam as 1000 horas estabelecidas pela norma ISO 13431 (1998).

O mesmo não aconteceu para os ensaios realizados com o geotêxtil GB, cujo polímero básico é o PET. Neste grupo, apenas para o ensaio em que a amostra foi carregada com 20% de sua resistência à tração obteve-se resposta equivalente a mais de 1000 horas. Ainda assim, o ganho que se obteve para este geotêxtil pode ser considerado satisfatório, com exceção do ensaio GB3 com carga equivalente a 60% da resistência à tração, que atingiu a ruptura.

A Tabela 4.1 resume a duração dos ensaios acelerados e o tempo de resposta equivalente obtido, que é, na verdade, a amplitude de tempo apresentada pela curva de fluência obtida por meio de ensaios acelerados, no presente caso, pelo SIM. Pode-se perceber destes resultados que o tempo equivalente de resposta é função do tipo de polímero, sendo que para o geotêxtil GA, de PP, os tempos de resposta de ensaios são sempre superiores aos equivalentes obtidos para o geotêxtil GB. O tempo equivalente de resposta pode ser função também do nível de carregamento aplicado. Esse fato parece ser mais explícito para o geotêxtil GA (excetuando-se o ensaio sob

carga de 60% da resistência à tração) do que para o geotêxtil GB, uma vez a contração térmica pode ter influenciado o efeito do aumento de temperatura nestes ensaios, para os geotêxteis fabricados a partir de PET.

TABELA 4.4 – Tempos de duração e resposta dos ensaios acelerados.

Ensaio		Duração (horas)	Tempo de resposta (horas)
Material	Carregamento (% da resistência à tração)		
GA	10	8	18229
GA	20	8	104167
GA	40	8	50625
GA	60	8	4000
GB	10	8	548
GB	20	8	20833
GB	40	8	945
GB	60	4,5	16

4.2.2.1 Comparação das curvas obtidas em ensaios convencionais e acelerados

As análises de qualidade das curvas de fluência não confinada, obtidas através de ensaios acelerados pelo método SIM, foram feitas visual e estatisticamente. Para contrastar os resultados, plotaram-se nos mesmos gráficos as curvas correspondentes.

FIGURA 4.24 – Comparação entre as curvas de fluência não confinada obtidas por ensaios convencionais e acelerados para o geotêxtil GA3, carregado com carga equivalente a 10% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.25 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencionais e acelerados para o geotêxtil GA3, carregado com carga equivalente a 20% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.26 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GA3, carregado com carga equivalente a 40% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.27 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GA3, carregado com carga equivalente a 60% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.28 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3, carregado com carga equivalente a 10% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.29 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3, carregado com carga equivalente a 20% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.30 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3, carregado com carga equivalente a 40% de sua resistência à tração.

FIGURA 4.31 – Comparação das curvas de fluência não confinada obtidas por ensaio convencional e acelerado para o geotêxtil GB3, carregado com carga equivalente a 60% de sua resistência à tração.

Visualmente, pode-se perceber uma concordância muito boa entre todas as curvas de ambos os geotêxteis. A maior discrepância ocorre na deformação inicial. As inclinações das retas resultantes apresentam-se muito próximas.

A Tabela 4.2, a seguir, resume os coeficientes angulares das retas obtidas através de regressão linear para as curvas apresentadas nas Figuras 4.24 a 4.31. São apresentados, nas Figuras 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35, gráficos comparativos entre estes parâmetros para todos os ensaios realizados. O objetivo da tabela, bem como das figuras, é respaldar a análise da qualidade dos ensaios acelerados realizados.

TABELA 4.5 – Apresentação dos coeficientes das retas obtidas por regressão linear para os resultados dos ensaios acelerados e convencionais – Modelo: $y = a \ln(x) + b$.

Carregamento (% da resistência à tração)	Deformação Inicial (%)	a	b	R ²	Deformação Inicial (%)	a	b	R ²
Geotêxtil GA3	SIM				CONVENCIONAL			
10	13,78	0,95	17,70	0,98	15,30	0,78	18,59	0,99
20	24,02	1,01	27,89	0,99	22,80	0,84	25,98	0,99
40	31,00	1,28	36,36	0,99	32,33	1,29	36,71	0,99
60	37,11	1,65 2,33	42,83	0,98 0,98	39,49	1,64 3,23	45,68	0,98 0,95
Geotêxtil GB3	SIM				CONVENCIONAL			
10	12,68	0,49	14,59	0,98	10,31	0,53	12,42	0,99
20	16,37	0,53	18,51	0,99	19,36	0,56	22,04	0,98
40	31,40	0,63	34,31	0,98	27,21	0,69	29,83	0,98
60	47,52	1,05	51,61	0,99	43,52	1,38	48,01	0,98

Sendo:

a – coeficiente de fluência

b – intercepto da reta

FIGURA 4.32 – Comparação entre as deformações iniciais dos ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GA.

FIGURA 4.33 – Comparação entre os coeficientes de fluência para os ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GA.

FIGURA 4.34 – Comparação entre as deformações iniciais dos ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GB.

FIGURA 4.35 – Comparação entre os coeficientes de fluência para os ensaios acelerados e convencionais – Geotêxtil GB.

As Figuras 4.32 a 4.35 trazem gráficos que permitem uma visualização detalhada da comparação das deformações iniciais e dos coeficientes de fluência, obtidos nos ensaios SIM e convencional. Estes gráficos apresentam os valores dos parâmetros analisados, dispostos em colunas, e também da diferença entre os mesmos, definida conforme a relação seguinte:

$$\text{Diferença (\%)} = 100 \cdot (|C_{\text{conv}} - C_{\text{sim}}|) / (C_{\text{conv}})$$

Sendo:

Cconv – o coeficiente considerado para o ensaio convencional;

Csim – o coeficiente considerado para o ensaio SIM;

| Cconv – Csim | - o módulo das diferenças dos coeficientes considerados.

Percebe-se, na Figura 4.32, que as diferenças calculadas para os valores dos coeficientes de fluência dos ensaios SIM e convencional para o geotêxtil GA, sob cargas equivalentes a 10% e 20% da resistência à tração, foram elevadas, ou seja, 21,79% e 20,24%, respectivamente. Na sequência dos ensaios, houve reduções significativas, sendo a diferença no ensaio GA3 40% de 0,77%, e na 1ª parte do ensaio GA3, 60% de 0,61%. As altas diferenças observadas nos primeiros ensaios podem estar associadas ao fato de estes terem sido os primeiros ensaios SIM realizados, somando-se a isto a variabilidade do material. Percebe-se, no entanto, que, com a prática, a diferença tende a diminuir. A exceção reside na 2ª. parte do ensaio GA3 60%, cuja diferença foi de 27% e na qual é nítida a divergência nas curvas de fluência (Figura 4.12). Essas diferenças são relativas, é importante notar que se tratando de diferenças absolutas, os valores são bastante reduzidos.

A deformação inicial, aparentemente, não está diretamente relacionada com a fluência. Porém, é possível utilizar as diferenças entre deformações iniciais, obtidas nas duas modalidades de ensaios realizadas, para se ter uma boa indicação da variabilidade do material. Isso auxilia a avaliação de possíveis discrepâncias encontradas nos resultados da fluência. A Figura 4.32 apresenta as diferenças encontradas na deformação inicial para os geotêxteis GA nas duas modalidades de ensaios realizadas. Percebe-se que as maiores diferenças registradas ocorrem nos ensaios GA3 sob carga equivalente a 10 e 20% da resistência à tração do geotêxtil, que atingiram, respectivamente 9,93 e 12,63%. Os ensaios GA3 40 e 60% apresentaram as seguintes diferenças de deformação inicial: 4,11 e 6,02%. Estes valores confirmam, a priori, a hipótese de que a diferença de deformação inicial é um bom indicador da semelhança, ou não, dos CP's utilizados em ensaios correspondentes (convencional e SIM), uma vez que os menores valores correspondem aos grupos de ensaios (convencional e SIM) que apresentaram valores

de coeficiente de fluência mais próximos, e ainda, que os ensaios convencionais e SIM são equivalentes, para este material.

Por sua vez, as diferenças percentuais encontradas para os coeficientes de fluência em ensaios SIM (em relação ao convencional) para os geotêxteis GB foram extremamente regulares (Figura 4.35), pelo menos para os ensaios submetidos a carga equivalente a 10, 20 e 40% da resistência à tração, ou seja: 7,55; 5,36 e 8,70, respectivamente. Os diferenças encontradas nos coeficientes de fluência para o geotêxtil GB não foram exagerados, tendo em vista a variabilidade encontrada para resistências e gramaturas (Coeficiente de variação de 3,75 e 7,82, respectivamente).

Quanto à deformação inicial, as diferenças encontradas entre as modalidades de ensaios realizadas com o geotêxtil GB estão apresentadas na Figura 4.34. Os ensaios submetidos a carga equivalente a 10% da resistência à tração apresentaram a maior diferença para este parâmetro: 22,99%. Para os carregados com 20% foi de 15,44%; com 40%, 15,40%; e com 60%, 9,19%. O segundo e o terceiro grupo de ensaios apresentaram diferenças de deformação inicial muito próximas, assim como os coeficientes de fluência. Isto colabora com a idéia de que este parâmetro é um bom indicador da homogeneidade da amostra. Porém, não é possível afirmar a hipótese, pois para o primeiro ensaio a diferença de deformação inicial afastou-se dos valores dos outros ensaios. É necessário, portanto, um maior número de dados para esclarecer a questão, para este material.

Para ambos os geotêxteis, os ensaios SIM a 60% da resistência à tração não reproduziram satisfatoriamente os ensaios convencionais. Para o geotêxtil GA submetido a carga equivalente a 60% da resistência à tração, a discrepância ocorreu apenas na segunda parte da curva, onde a diferença do coeficiente de fluência foi de 27,86%. O geotêxtil GB3 submetido a carga equivalente a 60% de sua resistência à tração apresentou diferença de 23,91%, mas o maior problema encontrado foi o curto tempo de resposta obtido devido à ruptura prematura ocorrida no ensaio. FARRAG (1998) afirma ser esse problema comum em ensaios acelerados sob carregamentos elevados.

Através da análise dos coeficientes angular das retas e das deformações iniciais obtidas a partir dos ensaios realizados, e, ainda, através da visualização dos gráficos dos ensaios, pode-se perceber que:

- as deformações iniciais dos ensaios, convencional e acelerado, nunca são iguais. Alguns fatos, como a variabilidade física dos materiais, tanto de gramatura, como de resistência, a forma de aplicação da carga nos ensaios, visto que é difícil garantir que o procedimento seja idêntico em dois ensaios distintos, podem explicar as diferenças observadas;
- a fluência, representada pela inclinação das retas apresentadas nas Figuras 4.23 a 4.30, cujos coeficientes angulares estão listados na Tabela 4.5, mostram, em geral, uma boa coincidência em todos os ensaios submetidos a carga equivalente de até 40% da resistência à tração dos geotêxteis estudados;
- os ensaios SIM e convencional, submetidos a carga equivalente a 60% da resistência à tração do geotêxteis GA, cuja gramatura é 300 g/m², (Figura 4.26), apresentam curvas que divergem, entre si, em seu trecho final (aproximadamente a partir de 100 horas);
- o geotêxtil GB, sob carga equivalente a 60% de resistência à tração, apresentou ruptura precoce no ensaio acelerado (Figura 4.30), fato que comprometeu o resultado final, ou seja, o tempo de resposta de fluência;
- quanto ao tempo de resposta dos ensaios acelerados, esperava-se que ele crescesse com o aumento da carga aplicada, uma vez que os passos do ensaio eram sempre os mesmos. A Tabela 4.4 sintetiza os tempos de resposta obtidos. Não foi possível, no entanto, confirmar essa relação. Para o geotêxtil GA, devido ao número reduzido de ensaios, não se pode afirmar que existe, ou não, tal relação. Já para o GB percebeu-se que a contração térmica também influi no tempo de resposta. Nesta pesquisa, as compensações dos efeitos da contração térmica foram feitas por translações verticais diretas, como pode ser visto na Figura 4.7. Porém, percebeu-se que, em se tratando de geotêxtil, este processo não é satisfatório, uma vez que a real contração pode ser mascarada pelo carregamento aplicado. Cabe lembrar que tal processo foi adotado a partir da literatura disponível sobre o método SIM, que tem sido aplicado às geogrelhas.

4.2.2.2 Comparação estatística das curvas de fluência obtidas pelo método SIM e convencional

A análise estatística foi realizada com o intuito de averiguar se as curvas obtidas através do SIM e pelo modo convencional, para materiais similares nas mesmas condições de carregamento, traduzem o mesmo fenômeno.

A análise estatística utilizada foi o teste para igualdade das inclinações (CHARNET et al., 1999), que se baseia nas seguintes hipóteses:

$$H_0 : \beta_{11} = \beta_{12} \text{ versus } H_1 : \beta_{11} \neq \beta_{12}$$

Sendo:

H_0 e H_1 – as hipóteses verdadeira e nula, respectivamente;

β_{11} – o coeficiente angular do modelo 1;

β_{12} – o coeficiente angular do modelo 2.

A formulação utilizada pode ser expressa como:

$$T_{\beta 1} = (\beta_{11} - \beta_{12}) / \sqrt{S_{\beta 1}} \quad (4.2)$$

Em que:

$$S_{\beta 1} = [(SQE_1 + SQE_2)/(n_1+n_2-4)] \cdot [(1/S_{xx1}) + (1/S_{xx2})] \quad (4.3)$$

Sendo:

SQE_i – o somatório dos quadrados dos erros do modelo i ;

n_i – o número de pontos do modelo i ;

S_{xx_i} – o somatório dos quadrados das abscissas do modelo i .

Para verificar as hipóteses, deve-se comparar o valor $T_{\beta 1}$ com um t da distribuição de Student para um nível α de confiança e (n_1+n_2-4) graus de liberdade, devendo o valor $T_{\beta 1}$ calculado ser menor em módulo que o valor tabelado t .

Para que fosse possível a realização deste teste, a abscissa (tempo de leitura dos ensaios) foi transformada segundo a relação:

$$X_{\text{teste}} = \text{Logaritmo do tempo de leitura}$$

A Tabela 4.3 resume os testes estatísticos realizados, cujo nível de confiança foi de 0,4 (máximo disponível na tabela de distribuição T de Student utilizada).

Quanto maior a diferença entre t de Student e o módulo de $T_{\beta 1}$, mais correspondência existe entre os ensaios testados, no caso, o convencional e o SIM. Percebe-se que a análise estatística fornece resultados bastante coincidentes com a observação visual. O grupo de ensaios denominado na Tabela 4.3 de GA3 40% forneceu o melhor resultado, ou seja, são ensaios que se correspondem muito bem. Os grupos de ensaios GA3 10%, GA3 20%, GA3 60% (1ª.parte), GB3 20% e GB3 40% forneceram resultados muito bons e apresentam, portanto, correlações muito boas. Os ensaios GB3 10% e GB3 60% apresentaram boas correlações. Os ensaios do grupo GA3 60% (2ª.parte) foram os únicos que não apresentaram correlação satisfatória, de acordo com a análise estatística.

Diante do que foi apresentado, percebe-se que o SIM é viável em diversas situações estudadas, recomenda-se seu uso para casos similares aos que, neste estudo, apresentaram boa concordância. Não se descarta, no entanto, o uso do método nas demais situações e outras mais que possam surgir, porém, é necessário o prosseguimento das pesquisas.

TABELA 4.6 - Comparação estatística dos ensaios SIM e convencional

Ensaio	Parâmetros da Regressão Linear (Coef. Angular)		n		Sxx		SQE		S_{β_1}	T_{β_1}	t (Student)	Resultado
	β_1 Conv.	β_1 SIM	Conv.	SIM	Conv.	SIM	Conv.	SIM				
GA3 10%	1,79	2,04	16	32	36,1	101,7	4098	42683	39,9	-0,03	0,255	Aceito
GA3 20%	1,93	2,32	16	32	36,8	120,1	4934	77220	66,3	-0,05	0,255	Aceito
GA3 40%	2,97	2,96	16	31	36,8	98,9	11676	84545	83,4	0,002	0,255	Aceito
GA3 60%	3,77	3,53	11	14	10,3	13,4	1354	2083	28,1	0,04	0,257	Aceito
	7,43	5,51	6	19	1,8	6,82	68	1201	43,3	0,29	0,257	Não
GB3 10%	1,23	0,92	16	32	36,8	43,9	1998	1607	4,1	0,15	0,255	Aceito
GB3 20%	1,28	1,22	16	31	36,8	87,6	2159	11363	12,1	0,02	0,255	Aceito
GB3 40%	1,59	1,46	15	32	36,5	48,9	3273	5000	9,2	0,04	0,255	Aceito
GB3 60%	3,18	2,42	16	22	36,8	19,15	13324	2042	35,9	0,13	0,256	Aceito

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Conclusões

O trabalho preocupou-se em caracterizar adequadamente as curvas isócronas dos geotêxteis testados através de ensaios convencionais de fluência e em experimentar a viabilidade de utilização dos ensaios SIM, de fluência acelerada. Apesar do reduzido número de ensaios feitos com esta técnica, o trabalho permite concluir que:

- a) a câmara de temperatura controlável, construída para a execução dos ensaios acelerados, apresentou desempenho satisfatório;
- b) os alcances das curvas de fluência obtidas nos ensaios acelerados, para o geotêxtil GA, foram satisfatórios. Para o geotêxtil GB, conclui-se que o alcance é afetado pela contração térmica, que deve ser caracterizada previamente aos ensaios;
- c) as diferenças percentuais obtidas para os coeficientes de fluência do geotêxtil GA são maiores do que as do geotêxtil GB;
- d) considerando-se os materiais e carregamentos utilizados, o ensaio acelerado pelo método SIM parece viável para ensaios carregados com carga equivalentes a até 40% de suas resistências à tração;
- e) o geotêxtil GA (fibras curtas de PP) apresentou em média maiores coeficientes de fluência que o geotêxtil GB (filamentos contínuos de PET), porém o seu

crescimento com o crescimento das cargas aplicadas é semelhante para os dois materiais;

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- a) estudar a forma de ocorrência da contração térmica em geotêxteis de PET para a aplicação no tratamento de curvas obtidas em ensaios acelerados pelo método SIM;
- b) realizar ensaios acelerados pelo método SIM em grande número e em diversos materiais, para melhor entender o comportamento dos resultados e assim testar melhor o método;
- c) estudar a relação do alcance das curvas de fluência com a carga aplicada, tempos de estágios e temperaturas dos mesmos em ensaios acelerados pelo método SIM.

Referências Bibliográficas

- CHRISTOPHER, B.R.; GILL, S.A.; GIROUD, J.P.; MITCHELL, J.; SCHLOSSER, F.; DUNNICLIFF, J. (1990). Design and construction guidelines for reinforced soil structures. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation, Report n. FHWA-RD-89-043, 285p.
- ABRAMENTO, M. (1995). Durabilidade e comportamento de longo prazo de geossintéticos – parte I: propriedades mecânicas e hidráulicas. In : GEOSSINTÉTICOS '95. *Anais*. São Paulo, p.217-226.
- ALLEN, T. M. (1991). Determination of long-term tensile strength of geosynthetics: A state-of-the-art review. In: GEOSYNTHETICS '91. *Proceedings*. Atlanta. v. 1, p.351-379.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994). ASTM D5262 – Standard test method for evaluating the unconfined tension creep behavior of geosynthetics. In: *Annual book of ASTM standards*. New York. p. 244-249.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR 12568 – *Geotêxteis – Determinação da gramatura*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). NBR 12593 – *Amostragem e preparação de corpos de prova de geotêxteis*. Rio de Janeiro.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1993). NBR 12824 – *Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada – Ensaio de faixa larga*. Rio de Janeiro.
- ASHMAWY, A K.; BORDEAU, P. L. (1996). Response of a woven and a nonwoven geotextile to monotonic and cyclic simple tension. *Geosynthetics International*, v.3, n.4, p.493-515.
- BALLENGEER, J. R.; WU, J. T. H. (1993). Intrinsic confined and unconfined load-deformation properties of geotextiles. In: CHENG, S. J. C. *Geosynthetics soil reinforcement testing procedure*. Philadelphia. p.16-31.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1991). BS 6906-5. *Methods of test for geotextiles. Determination of creep*. London.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1995). BS 8006. *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. London.
- BUENO, B.S. (1987). *The behaviour of thin walled pipes in trenches*. Leeds, Leeds University (Theses D.S.). 325p.
- BUSH, D. I. (1990). Variation of long term design strength of geosynthetics in temperatures up to 40° C. In: GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4th, The Hague, 1990. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. v.2, p.673-676.
- CAZZUFFI, D.; GHINELLI, A.; SACCHETTI, M.; VILLA, C. (1997). European experimental approach to the tensile creep behavior of high-strength geosynthetics. In: GEOSYNTHETICS'97. *Proceedings*. California. v.1. , p.253-266.

- CHRISTOPHER, B.R.; GILL, S.A.; GIROUD, J.P.; MITCHELL, J.; SCHLOSSER, F.; DUNNICLIFF, J. (1990). *Design and construction guidelines for reinforced soil structures*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Report n. FHWA-RD-89-043, 285p.
- COOKE, T. F.; REBENFELD, L. (1988). Effect of chemical composition and physical structure of geotextile on their durability. *Geotextiles and Geomembranes*, n.7, p.7-22
- COSTA, C. M. L. (1999). *Fluência em geotêxteis*. São Carlos. 97p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CHARNET, R.; FREIRE, C.A.L.; CHARNET, E.M.R.; BONVINO, H. (1999). *Análise de modelos de regressão linear com aplicações*. Unicamp. Campinas. 356p.
- DEN HOEDT, G. (1986). Creep and relaxation of geotextile fabrics. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 4, n. 2, p. 83-92.
- DUVALL, D.E.; EGAN, P.D. (1990). Evaluation of creep-rupture properties of geosynthetics. In: GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4th, The Hague, 1990. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. v.2, p.678.
- FARRAG, K. (1998). Development of an accelerated creep testing procedure for geosynthetics – Part II: Testing. *Geotechnical testing journal*. v.21., n.1, p. 38-44.
- FARRAG, K.; SHIRAZI, H. (1997). Development of an accelerated creep testing procedure for geosynthetics – Part I: Testing. *Geotechnical testing journal*. v.20., n.4, p. 414-422.

FELDMAN, D. (1989). *Polymeric building materials*. Elsevier science

GREENWOOD, J. H. (1990). Creep of geotextiles. In: GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4th., The Hague, 1990. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. V.2, p.645-650.

HOLLAWAY, L. (1993). *Polymer composites for civil and structural engineering*. Glasgow, Chapman & Hall.

HORROCKS, A. R.; D'SOUZA, J. A. (1992). Degradation of polymer in geomembranes and geotextiles. In: HAMID, S. H. et al. *Handbook of polymer degradation*. New York, Marcel Dekker. Cap. 15, p.433-505.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTDIZATION (1998). ISO 13431 – *Geotextile and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behaviour*. Switzerland.

INGOLD, T.S. (1982). *Reinforced earth*. Thomas Telford. London, p. 141.

JEWELL, R. A (1996). *Soil reinforcement with geotextiles*. London, CIRIA.

JEWELL, R. A.; GREENWOOD, J. H. (1988). Long term strength and safety in steep soil slopes reinforced by polymer materials. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 7, n. 1 e 2, p.81-118.

JONES, C.J.F.P. (1994). Limit mode method of analysis for retaining walls and bridge abutments. In: ed. HAUSMANN, M. R. *Geosynthetics in road engineering*. Australia. p. 113-140.

KOERNER, R. M. (1998). *Designing with geosynthetics*. 4.ed. New Jersey, Prentice-Hall.

- KOERNER, R. M.; LORD, A. E. Jr.; HALSE, Y. H. (1988). Long term durability and aging of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, v.7, p.147-158.
- KOERNER, R. M.; LORD, A. E. Jr.; HSUAN, Y. H. (1992). Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation. *Geotextiles and geomembranes*, v. 11, n. 2, p. 151-183.
- LEVACHER, D.; BLIVET, J. C.; MSOUTI, F. (1994). Tensile and creep behavior of geotextiles. In GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 5th. *Proceedings*. Singapore. v.3, p.1131-1134.
- MANO, E. B. (1991). *Polímeros como materiais de engenharia*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 197p.
- MATICHARD, Y.; LECLERQ, B.; SEGOUIN, M. (1990). Creep of geotextiles: soil reinforcement applications. In: GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4th, The Hague, 1990. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. v.2, p.661-665.
- McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; KABIR, M. H. (1982). Loas-extension testing of geotextiles confined in soi. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 2nd, 1982. *Proceedings*. Las Vegas, v. 3, p. 793-798.
- McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; MURRAY, R. T. (1986). The load-strain-time-temperature behavior of geotextiles and geogrids. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 3rd, 1986. *Proceedings*. Vienna, v.3, p. 707-712.
- MIKI, H.; HAYASHI, Y.; YAMADA, K.; TAKASAGO, T.; SHIDO, H. (1990). Plane strain tensile strength and creep of spun-bonded non-wovens. In: GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4th, The Hague, 1990. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. v. 2, p. 667-672.

- MITCHELL, J.K.; VILLET, W.C.B. (1987). Reinforcement of earth slopes and embankments. *National Cooperative Highway Research Program Report*. n. 290.
- MOREIRA, C. V. R.; PIRES NETO, A. G. (1998). Clima e relevo. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A., ed. *Geologia de engenharia*. São Paulo, Oficina de textos. Cap. 5, p. 69-85.
- MSOUTI, M. F., BLIVET, J. C., LEVACHER, D. (1997). Comportement au fluage des géotextiles en renforcement mécanique. *Études et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées*, GT n. 63.
- MÜLLER-ROCHHOLZ, J. (1998). Practicalities of measurement of creep and stress rupture. In: CREEP AND ASSESSMENT OF GEOSYNTHETICS FOR SOIL REINFORCEMENT. ; Leatherhead, 1997. *Proceedings*, ERA Report 98-0015, p.1.1-1.12.
- MÜLLER-ROCHHOLZ, J.; KIRSCHNER, R. (1990). Creep of geotextiles at different temperatures. In: GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 4th, The Hague, 1990. *Proceedings*. Rotterdam, Balkema. v. 2, p. 657-659.
- MÜLLER-ROCHHOLZ, J.; KOSLOWSKI, C. (1996). Creep prediction. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 1. *Proceedings*. The Netherland. p.1027-1030.
- MURRAY, R T.; McGOWN, A. (1988). Durability of geotextiles. *Assessment of the time dependent behavior of geotextiles for reinforced applications*. London, Chapman and Hall, p.53-73.
- PALMEIRA, E. M. (1999). *Solo reforçado*. Husker Ltda.

- SHRESTHA, S. C.; BELL, J. R. (1982). Creep behavior of geotextiles under sustained loads. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 2nd, 1982. *Proceedings*. Las Vegas, v. 3, p. 769-774.
- SHELTON, W. S.; BRIGHT, D. G. (1993). Using Arrhenius equation and rate expressions to predict the long-term behavior of geosynthetic polymers. In: GEOSYNTHETICS'93. *Proceedings*. Vancouver, p.789-801.
- THORNTON, J. S.; ALLEN, S. R.; THOMAS, R. W. (1997). Approaches for the prediction of long term viscoelastic properties of geosynthetics from short term tests. In: GEOSYNTHETICS '97. *Proceedings*. California, v.1. , p.277-291.
- THORNTON, J. S. (1998). The stepped isothermal method (SIM) for time-temperature superposition. In: CREEP AND ASSESSMENT OF GEOSYNTHETICS FOR SOIL REINFORCEMENT; Leatherhead, 1997. *Proceedings*. ERA Report 98-0015, p.2.1-2.9.
- THORNTON, J. S.; ALLEN, S. R.; THOMAS, R. W.; SANDRI, D. (1998). The stepped isothermal method for time-temperature superposition and its application to creep data on polyester yarn. In: SIXTH CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS. *Proceedings*. Atlanta, v.2, p. 691-698.
- TAKAKU, A. (1980). Effect of temperature on creep fracture of polypropylene fibers. *Journal of Applied Polymers Science*, vol. 25, 1861-1866. United States.
- TUPA, N.; PALMEIRA, E. M. (1995). Comportamento de geotêxteis não-tecidos confinados em solos finos. In: GEOSSINTÉTICOS'95. *Anais*. São Paulo, p. 139-147.
- VAN ZANTEN, R. V. (1986). *Geotextiles and geomembranes in civil engineering*. Rotterdam, Balkema.

- WU, J. T. H. (1991). Measuring inherent load-extension properties of geotextiles for design of reinforced structures. *Geotechnical Testing Journal*, v. 14, n. 2, p. 157-165.

APÊNDICE 1

Neste apêndice apresenta-se um roteiro para a realização do ensaio SIM. Para a elaboração deste roteiro, procurou-se associar as prescrições normativas a respeito do ensaio de fluência não confinada em geotêxteis (ISO 13431, 1998), as recomendações dos artigos estudados (THORNTON, 1997 e THORNTON et al., 1998) e ainda, as observações desenvolvidas ao longo deste trabalho.

1 – Objetivo

Este roteiro é específico para a determinação do comportamento de deformação sob fluência de geotêxteis pelo *Stepped Isothermal Method* (SIM).

2 – Características do roteiro

Este roteiro foi organizado com base na experiência obtida na confecção de um equipamento para ensaios acelerados pelo método SIM e na execução de alguns ensaios. Não tem a pretensão, portanto, de substituir nenhuma norma existente, e sim, servir de auxílio para a execução de ensaios.

Algumas recomendações de norma serão discutidas, se necessário.

3 – Considerações

As definições adotadas, bem como as características e número de corpos de prova não serão mencionados aqui, uma vez que fazem parte da norma adotada para a execução dos ensaios. Nesta pesquisa, em particular, adotou-se a ISO 13431 (1998).

4 – A respeito das recomendações de norma

As normas, em geral, exigem que o ambiente de ensaio tenha condições de umidade e temperatura constantes. A temperatura, óbvio, não é constante no caso de

ensaio SIM. Já quanto à umidade, ficaria extremamente complicado mantê-la constante nesses ensaios, uma vez que a temperatura atinge valores bastante elevados. Porém, devido à curta duração dos ensaios, este fator não deve ter muita importância, podendo ser relevado.

A norma também tece considerações quanto aos tempos de leitura, que deverão ser adaptados no caso de ensaios SIM.

As demais recomendações devem ser seguidas rigidamente.

5 – Equipamento

O equipamento utilizado está descrito no capítulo 3, porém algumas considerações são importantes.

Ao se projetar um ambiente para a execução de ensaio SIM, devem ser levados em consideração, além dos aspectos relativos à eficiência térmica e geometria, fatores como:

- Facilidade na instalação do CP: Este aspecto deve ser levado em conta quando se planeja o acoplamento de um pórtico com a câmara de ambiente controlável. Esta deve ser dotada de abertura em local adequado para a instalação segura do CP no pórtico e dos sensores de temperatura no CP.
- Altura do equipamento: Tanto o pórtico como a câmara devem ter altura suficiente para que o CP se deforme livremente, sem que qualquer um dos componentes de ensaio (garras, haste e carga) possa se apoiar em algum lugar.

6 – Contração térmica

Quando o material ensaiado apresentar contração térmica (caso do PET), é recomendável que, antes de se executarem os ensaios SIM, se estude a curva de contração térmica (deformação por contração térmica *versus* temperatura) para as temperaturas que serão utilizadas. Esta curva deverá auxiliar o tratamento das curvas obtidas dos ensaio SIM, no que diz respeito à eliminação deste efeito indesejável.

7 – Planejamento do ensaio

Os ensaios acelerados pelo método SIM não têm uma duração pré-estabelecida. Cada ensaio a ser realizado deverá ser planejado de modo que se estabeleçam as durações dos patamares e o número e a amplitude das rampas, a fim de que, após tratamento adequado das respostas, se obtenha a curva de fluência para o tempo esperado.

Seguem duas recomendações, encontradas na literatura (THORNTON et al., 1997):

- Idealmente os patamares devem ter duração de, pelo menos, 10.000 segundos, ou 2,8 horas;
- As rampas não devem ser muito elevadas, recomendam-se valores entre 10 e 15° C.

8 – Execução do ensaio

O início do ensaio, ou seja, a instalação do CP no pórtico, leitura da pré-carga, carregamento e leituras até o fim do primeiro estágio seguem os procedimentos padrões das normas.

Juntamente com a última leitura do primeiro estágio, deve-se iniciar o procedimento denominado rampa, ou seja, a temperatura deve ser elevada em um tempo bastante reduzido, recomenda-se que este seja de 1 a 2 minutos. O objetivo da rapidez na mudança de temperatura é a manutenção das condições do CP antes e após instalada a nova temperatura. O ensaio, então, segue assim como o estágio anterior até a nova mudança de temperatura. E assim por diante.

Para facilitar o tratamento dos resultados, recomenda-se que se façam mais leituras do que as normas recomendam para os intervalos utilizados. Pode-se, por exemplo, seguir as recomendações da ISO 13431 (1998) para tempos de até 30 minutos e, a partir desta leitura, fazê-las de 30 em 30 minutos (aproximando-se a duração da rampa para, pelo menos, 3 horas).

9 – Recomendações finais

O ensaio de fluência, executado pelo método SIM, permite que se obtenha em tempos reduzidos respostas longas. É bastante recomendável, devido à variabilidade, que se repitam ensaios em pelo menos três CP's de uma mesma amostra, para cada carga estudada, eliminando-se, assim, a questão da variabilidade apresentada por muitos geotêxteis.