FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA

**Novo equipamento para realização de ensaios confinados e
acelerados de fluência em geossintéticos**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências, Programa de Pós-graduação em Geotecnia.

Orientador:
Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

São Carlos

2012

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FAGNER ALEXANDRE NUNES DE FRANÇA**

Título da Tese: "Novo equipamento para realização de ensaios confinados e acelerados de fluência em Geossintéticos."

Data da defesa: 20/01/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Benedito de Souza Bueno (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **Orencio Monje Vilar**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Marcos Massao Futai**
(Escola Politécnica/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Ennio Marques Palmeira**
(Universidade de Brasília)

Aprovado

Prof. Dr. **Maurício Abramento**
(Escola Politécnica/USP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

*A Marília, minha esposa especialmente única,
por todo seu amor, carinho e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem Ele nada é possível.

A Marília, minha esposa, que abriu mão de tantas coisas para me acompanhar de perto nessa caminhada, como faz em todos os momentos da minha vida. Sempre fazendo o possível para me ver feliz, suas atitudes me fazem amá-la cada vez mais. Não há como recompensar tamanha dedicação.

A Dilma Ottoni, minha sogra, por suas orações, dedicação e apoio incondicional. Agradeço também por estar presente em vários momentos importantes da minha vida.

A meus pais, que, apesar da distância, acompanharam meus passos em mais esta etapa. Certamente, a disciplina e organização aprendidas em casa foram fundamentais para a conclusão desta tese.

Aos primos Nevinha, Eliana, Abadia e César, por sua grande amizade em todo esse tempo.

A Maria do Socorro Cavalcanti (Titia), pelo seu carinho, afeto e atenção em todos os momentos.

A Tia Dinah, Rosemilton e sua família, por toda a consideração, cuidado e prontidão em momentos de dificuldade.

Aos meus amigos Fernando, Letícia, Helena e Beatriz, pela amizade, ótimos momentos e acolhimento tão caloroso durante a minha estadia em Austin.

Aos meus amigos de pós-graduação, pela amizade construída com a convivência em São Carlos.

Ao Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno, pela sua orientação, não apenas profissional, mas também pessoal. Apreendi muitas lições com ele e gostaria de deixar o meu sincero agradecimento.

Ao Prof. Dr. Jorge Gabriel Zornberg por ter me acolhido tão amigavelmente em Austin e, ainda antes disso, por compartilhar suas sugestões que ajudaram a enriquecer esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Orencio Monje Vilar, por todo seu apoio, principalmente na etapa final para conclusão desta tese.

Ao Prof. Edmundo Rogério Esquível, por sua amizade e companheirismo durante a minha pós-graduação na EESC/USP.

Ao Prof. José Carlos Ângelo Cintra, por sua amizade, conversas e pelas oportunidades dadas durante a minha pós-graduação na EESC/USP.

Ao Prof. Tarcísio Barreto Celestino, por sua amizade e pelos aconselhamentos em momentos de decisões a serem tomadas.

Aos demais professores e funcionários do corpo técnico do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. A boa convivência e prontidão em ajudar certamente são aspectos importantes do nosso departamento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo cedida durante esta pesquisa e pelo financiamento da minha estadia em Austin, EUA, durante o Estágio no Exterior (PDÉE).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro dado ao projeto ao qual esta pesquisa está relacionada.

À Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo e à Huesker Ltda. pelo apoio financeiro para minha participação no 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, em Toronto, Canadá (Outubro, 2011).

Ao Departamento de Geotecnia da EESC/USP pelo apoio financeiro para minha participação no VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, em Belo Horizonte (Novembro, 2011).

Às empresas Allonda Geossintéticos Ambientais, Huesker Ltda., Mexichem Bidim, Ober Geossintéticos, Formato Coberturas Especiais Ltda. e Mineração Jundu Ltda. pela doação de materiais para esta pesquisa.

“If you can dream it, you can do it.”

Walter Disney

RESUMO

FRANÇA, F. A. N. **Novo equipamento para realização de ensaios confinados e acelerados de fluência em geossintéticos**. 2011. 259 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

A fluência dos geossintéticos encontra-se entre as propriedades mais relevantes no projeto de estruturas de solo reforçado com esses materiais. A caracterização desse fenômeno emprega ensaios normalizados e de baixa complexidade, que apresentam dois aspectos negativos principais: a duração e o fato de não considerarem o efeito da interação dos geossintéticos com o solo circundante. Ensaio conduzidos em temperatura elevada e em câmaras que simulam o confinamento do solo apresentam-se como alternativas para solucionar cada um desses empecilhos, mas apenas separadamente. Diante disso, esta pesquisa visou desenvolver um novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos que incorpora, simultaneamente, ambas as medidas utilizadas para mitigar esses dois aspectos. Cinco tipos de geossintéticos (duas geogrelhas, dois geotêxteis não tecidos e um geotêxtil tecido) foram submetidos a ensaios de fluência em diferentes condições de confinamento e temperatura, de maneira combinada ou não. Ensaio de ruptura por fluência em condição confinada e a determinação da resistência à tração residual de corpos de prova submetidos à diferentes períodos de fluência também foram incluídos no programa experimental. O novo equipamento mostrou-se bastante versátil, permitindo a realização de quatro tipos de ensaios: convencionais, confinados, acelerados e confinado-acelerados. As deformações por fluência mostraram-se dependentes do confinamento nas geogrelhas e nos geotêxteis não tecidos e independentes no geotêxtil tecido. Assim, destaca-se que as geogrelhas tiveram um comportamento em fluência diferente daquele previsto na literatura técnica, uma vez que as deformações por fluência desses materiais são comumente referidas como independentes do confinamento. A elevação da temperatura de ensaio mostrou-se eficaz para a aceleração das deformações por fluência em todos os geossintéticos testados. Adicionalmente, verificou-se que a resistência residual dos geossintéticos é pouco afetada pela ocorrência de deformação por fluência. O novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos permite considerar um dos aspectos mais controversos no projeto de estruturas de reforço de solo com geossintéticos sob uma nova perspectiva.

Palavras-chave: Geossintéticos. Fluência dos materiais. Confinamento. Temperatura.

ABSTRACT

FRANÇA, F. A. N. **New equipment to conduct confined-accelerated creep tests on geosynthetics**. 2011. 259 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Creep behavior plays an important role in geosynthetics reinforced soil structures. Its characterization is commonly performed by means of standard tests in which in-isolation specimens are subjected to a constant load while their elongation is measured over time. Despite their widespread use, standard creep tests present two main negative aspects. Firstly, they may last up to 10.000 hours. In addition, they do not consider the possibly significant effect of soil-geosynthetic interaction. Therefore, tests conducted under standard procedures may increase the costs of full creep behavior characterization and result in conservative parameters. Tests conducted at elevated temperature and with special chambers in which the specimens are subjected to confining stresses may be used provide an insight on the soil-geosynthetic interaction in accelerated tests. Both measures have been broadly published in the technical literature, but only independently. In this regard, this dissertation presents a new piece of equipment developed to conduct confined-accelerated creep tests on geosynthetics. Five different geosynthetics were subjected to creep tests with the new equipment (two geogrids, two nonwoven geotextiles and one woven geotextile). In addition, creep rupture tests were performed with both geogrids and the residual tensile strength of specimens were determined by tensile tests performed after creep tests in different conditions. The new creep test equipment was found to be able to performed four different types of test: conventional, confined, accelerated and confined-accelerated ones. The creep behavior of the geogrids was found to be confinement-dependent. This is not mentioned in technical literature. On the other hand, both types geotextiles behaved as expected regarding their confined creep behavior. The woven geotextile creep behavior was independent of confining stresses in sand whereas the nonwoven geotextile creep deformations were strongly reduced by confinement in sand. In addition, the creep deformations of every tested geosynthetic increased with temperature. The tensile tests performed after creep tests showed that the residual strength of the geosynthetics was approximately equal to the values found with virgin specimens. The new creep testing equipment performance was adequate, since it was able to simultaneously address both main concerns of standardized creep tests on geosynthetics.

Keywords: Geosynthetics. Creep. Confinement. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo das fases da fluência de geossintéticos através do resultado obtido com um geotêxtil tecido de polipropileno submetido a uma solicitação de tração igual a 67% de sua resistência, no sentido transversal de fabricação.	41
Figura 2.2 – Representação das deformações dependentes do tempo nos geossintéticos: a) Modelo mecânico; b) Representação gráfica obtida a partir desse modelo (adaptada de DEAN; BROUGHTON, 2007 e SAWICKI, 1999).....	43
Figura 2.3 – a) Modelo mecânico modificado; b) Representação gráfica para o comportamento previsto por esse modelo (adaptado de SAWICKI; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, 1998).....	44
Figura 2.4 – Representação gráfica comumente utilizada em estudos de fluência de geossintéticos (tempo em escala logarítmica).	45
Figura 2.5 – Representação gráfica das deformações por fluência proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004).....	46
Figura 2.6 – Procedimento para o traçado das curvas isócronas: a) Curva tempo-deformação; b) Curva deformação-carregamento aplicado.....	47
Figura 2.7 – Exemplo da obtenção da curva de ruptura por fluência: a) Curva tempo-deformação; b) Curva de ruptura por fluência.	48
Figura 2.8 – Exemplos da variação do comportamento tensão-deformação de geossintéticos devido a diferentes fatores: a) Comportamento tensão-deformação elasto-plástico típico em geossintéticos; b) Dependência da temperatura e da velocidade de aplicação do carregamento; c) Dependência da direção de carregamento; d) Exemplo da aplicação de carregamento cíclico (adaptado de PERKINS, 2000).....	49
Figura 2.9 – Deformação das fibras de um geotêxtil tecido submetido a uma solicitação de tração: a) Sentido longitudinal à aplicação do carregamento; b) Sentido transversal à aplicação do carregamento (adaptado de DEN HOEDT, 1986)..	51
Figura 2.10 – Curvas de fluência de fibras de diferentes polímeros submetidas a 20% da resistência à tração (a) e a 60% da resistência à tração (b), indicando a influência do tipo de polímero na fluência do geossintético (adaptado de DEN HOEDT, 1986).....	53

Figura 2.11 – a) Curvas de fluência de diferentes geogrelhas submetidas a carregamentos iguais a 60% da resistência à tração, indicando a influência do tipo de polímero na fluência do geossintético; b) Arranjo geral para ensaio de fluência de uma geogrelha biaxial de polipropileno; c) Arranjo geral para ensaio de fluência de uma geogrelha uniaxial de polietileno de alta densidade (adaptado de SHINODA; BATHURST, 2004b).	54
Figura 2.12 – Influência do nível de carregamento no comportamento em relação à fluência de geossintéticos (adaptado de SIMONINI; GOTTARDI, 2003).	55
Figura 2.13 – Efeito da velocidade de aplicação do carregamento na fluência de uma geogrelha de PEAD, submetida a 40% da resistência à tração (adaptado de RIMOLDI; MONTANELLI, 1993).	56
Figura 2.14 – Influência da velocidade de carregamento no ensaio de tração para geotêxtil tecido de polipropileno, no sentido transversal (adaptado de ANDRAWES; MCGOWN; KABIR, 1984).	57
Figura 2.15 – Influência da velocidade de aplicação do carregamento no ensaio de tração para uma geogrelha de PEAD (a) e de PET (b) (adaptado de SHINODA; BATHURST, 2004a).	58
Figura 2.16 – Efeito da velocidade de aplicação da solicitação em ensaio de placa realizado sobre uma estrutura de solo reforçado com geogrelhas e areia com densidade relativa igual a 70%, em escala reduzida (adaptado de ALAWAJI, 2005).	59
Figura 2.17 – Influência da temperatura nas deformações por fluência de uma membrana de poliamida (adaptado de SCAFFARO; DINTCHEVA; LA MANTIA, 2008). ..	59
Figura 2.18 – Efeito da temperatura nas deformações por fluência de geogrelhas de poliéster e de polietileno de alta densidade (adaptado de FARRAG; SHIRAZI, 1997).	60
Figura 2.19 – Efeito do confinamento em solo nas deformações por fluência em um geotêxtil não-tecido agulhado de polipropileno (adaptado de COSTA, 1999).	62
Figura 2.20 – Efeito do confinamento sobre as deformações por fluência segundo o tipo de polímero em geotêxteis não-tecidos: a) termoligado, 33% PEAD e 67% PP; b) agulhado, 100% PET (adaptado de MCGOWN; ANDRAWES; KABIR, 1982).	63
Figura 2.21 – Sinergia entre a degradação química e fluência de fibras de poliéster (adaptado de TRENTINI; VIDAL; MARTINS, 2006).	64

Figura 2.22 – Relação entre fluência e envelhecimento de geossintéticos através de simulações numéricas (adaptado de KONGKITKUL; TATSOUKA; HIRAKAWA, 2007).	65
Figura 2.23 – Resultado típico de ensaios de ruptura por fluência (adaptado de ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).....	66
Figura 2.24 – Equipamento típico para ensaio de fluência em geossintéticos (adaptado da norma ASTM D 5262).....	67
Figura 2.25 – Translação horizontal dos resultados de ensaios de fluência conduzidos em temperaturas diferentes com o mesmo nível de carregamento.	69
Figura 2.26 – Exemplo da variação do fator de translação com a temperatura de ensaio para uma geogrelha de PEAD (adaptado de FARRAG, 1998).	72
Figura 2.27 – Geração da curva mestra de fluência pelo método SIM em um geotêxtil tecido de PP com carregamento igual a 30% da sua resistência à tração: a) Dados brutos em escala natural; b) Dados em escala logarítmica; c) Curva mestra de fluência (adaptado de ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).....	75
Figura 2.28 – Configuração empregada em ensaios confinados de fluência em geossintéticos nos quais o carregamento é aplicado diretamente ao corpo de prova (adaptado de COSTA, 2004).....	77
Figura 2.29 – Configuração empregada em ensaios confinados de fluência em geossintéticos nos quais a tensão confinante é aplicada ao solo circundante e as tensões no corpo de prova são desenvolvidas a partir da interação solo-geossintético (adaptado de COSTA, 2004).	78
Figura 2.30 – Esquema do equipamento empregado em estudo pioneiro sobre o efeito do confinamento em solo na fluência dos geossintéticos (adaptado de MCGOWN; ANDRAWES; KABIR, 1982).	79
Figura 2.31 – Obtenção do fator de redução por fluência.	82
Figura 2.32 – Resistência residual após fluência com carregamentos iguais a 20 e 30% da resistência à tração comparada à curva de ruptura por fluência obtida com uma geogrelha de polipropileno (adaptado de ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).....	84
Figura 2.33 – Modos de degradação (GREENWOOD; BRADY; WATTS, 2002).	85
Figura 3.1 – Concepção inicial do novo equipamento para realização de ensaios de fluência de geossintéticos.	89

Figura 3.2 – Proposta de sistema de alavanca para aplicação da solicitação de tração no corpo de prova.	91
Figura 3.3 – a) Efeito da associação de cinco polias (três móveis e duas fixas); b) Elementos adotados no projeto do novo equipamento de fluência em geossintéticos para elevar a solicitação de tração aplicada por pesos livres.	92
Figura 3.4 – Proposta para o sistema de aplicação do carregamento com auxílio da associação de polias.	92
Figura 3.5 – Garra do tipo rolete adotada no novo equipamento para realização de ensaios de fluência de geossintéticos.	93
Figura 3.6 – Posicionamento da garra do tipo rolete e da célula de carga adotado no novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos.	94
Figura 3.7 – Sistema de medição do alongamento dos corpos de prova adotado no novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos.	95
Figura 3.8 – Divisão da câmara de ensaios em dois compartimentos, adotada no novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos.	96
Figura 3.9 – Aspecto do corpo de prova após a sua utilização em ensaio-teste confinado de fluência conduzido no novo equipamento e destaque para o ponto de fixação do fio inextensível.	97
Figura 3.10 – Aspecto do corpo de prova reforçado com cola de contato antes (a) e após (b) a sua utilização em ensaio-teste confinado de fluência conduzido no novo equipamento.	97
Figura 3.11 – Aspecto do corpo de prova reforçado com adesivo bicomponente à base de resina epóxi e recoberto com folha de poliéster após a sua utilização em ensaio-teste confinado de fluência conduzido no novo equipamento.	98
Figura 3.12 – Aspecto do corpo de prova reforçado com adesivo bicomponente à base de resina epóxi e posicionado entre geomembranas de polietileno de alta densidade lubrificadas antes (a) e após (b) a remoção do novo equipamento. .	99
Figura 3.13 – a) Vista lateral esquemática do novo equipamento de ensaios de fluência em geossintéticos; b) Fotografia de um ensaio em execução.	100
Figura 3.14 – Fases da preparação (a) e dimensões (b) dos corpos de prova utilizados no novo equipamento.	102

Figura 3.15 – Montagem dos ensaios de cisalhamento direto para avaliação da resistência ao cisalhamento da interface entre geomembrana e os corpos de prova: a) Materiais fixados a blocos de madeira; b) Geomembrana posicionada no anel inferior da máquina de cisalhamento direto; c) Vaselina industrial aplicada sobre a geomembrana; d) Posicionamento do anel superior da máquina de cisalhamento direto; e) Bloco de madeira com amostra do corpo de prova posicionado sobre a vaselina industrial; f) Montagem concluída.	104
Figura 3.16 – a) Curvas deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante obtidas nos ensaios de cisalhamento direto da interface entre as regiões reforçadas dos corpos de prova e a face lisa das geomembranas; b) Envoltória de resistência resultante dessa série de ensaios.	105
Figura 3.17 – Sequência para colocação da bolsa de ar pressurizado e fechamento da câmara de ensaio.	106
Figura 3.18 – Localização das células de tensão total empregadas na verificação das tensões normais no interior da câmara de ensaio sem a utilização do corpo de prova: a) 12 mm de profundidade; b) 88 mm de profundidade; c) Vista lateral.	108
Figura 3.19 – Verificação das tensões totais no interior da câmara de ensaios, célula 100-CP: a) Exemplo da variação das leituras; b) Exemplo da relação entre pressão aplicada na bolsa de ar e as tensões mensuradas.	109
Figura 3.20 – Distribuição das tensões totais verticais no interior da câmara de ensaio a 12 mm de profundidade (coeficientes angulares das retas de ajuste por regressão linear).	111
Figura 3.21 – Localização das células de tensão total empregadas na verificação das tensões normais no interior da câmara de ensaio com a utilização do corpo de prova: a) 24 mm de profundidade; b) 68 mm de profundidade; c) Vista lateral.	112
Figura 3.22 – Distribuição das tensões totais verticais no interior da câmara de ensaio na montagem com corpo de prova: a) 24 mm de profundidade; b) 68 mm de profundidade.	113
Figura 3.23 – Exemplo da variação das leituras das células de tensão total obtida no teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento.	115
Figura 3.24 – Preenchimento do compartimento inferior com areia e localização do termopar 1 (TP-1).....	118

Figura 3.25 – Variação de temperatura nos termopares 1 e 2 durante calibração (a) e curva de calibração típica do sistema de aquecimento (b) obtidas a partir dos testes realizados com a geogrelha de poliéster.	119
Figura 3.26 – Componentes do equipamento, com destaque para aqueles posicionados em sua parte superior.	122
Figura 3.27 – Curvas de calibração das células de carga isoladas (a) e acopladas ao novo equipamento (b).	123
Figura 3.28 – Calibração dos transdutores de deslocamento: a) Montagem utilizada; b) Resultado da calibração.	125
Figura 3.29 – Câmara de ensaio antes do fechamento em montagem para verificação dos fios inextensíveis.	126
Figura 3.30 – Deslocamento dos elementos metálicos e temperatura no interior da câmara de ensaio durante a verificação dos fios inextensíveis.	126
Figura 3.31 – Aparelhos utilizados no sistema de aquisição dos dados: a) Leituras de deslocamento e das células de carga (Model P3 Strain Indicator and Recorder); b) Controlador de temperatura.	128
Figura 3.32 – Sequência de preenchimento da câmara de ensaio com solo e posicionamento do corpo de prova.	129
Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos solos utilizados nesta pesquisa.	137
Figura 4.2 – Envoltórias de resistência da areia (solo A) em diferentes condições de compactidade, obtidas a partir dos valores de pico (a) e residuais (b) das curvas deslocamento horizontal <i>versus</i> tensão cisalhante de ensaios de cisalhamento direto.	139
Figura 4.3 – a) Exemplo de curva de fluência com o tempo em escala logarítmica; b) Representação gráfica das deformações por fluência proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004) para o ensaio em consideração.	143
Figura 5.1 – Evolução da solicitação de tração durante os ensaios confinado e confinado-acelerado conduzidos com o GTNcurto para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos: a) Ensaio confinado de fluência; b) Ensaio confinado de fluência, escala vertical aumentada; c) Ensaio confinado-acelerado de fluência; d) Ensaio confinado-acelerado de fluência, escala vertical aumentada.	148

Figura 5.2 – Exemplo do cálculo da solicitação de tração média (ensaio confinado de fluência conduzido com o GTNcurto).	150
Figura 5.3 – Evolução da temperatura registrada pelos termopares durante o ensaio confinado-acelerado conduzido com o GTNcurto para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos: a) Registro completo; b) Destaque para as quedas de energia; c) Destaque para o início do registro.	151
Figura 5.4 – Evolução da temperatura registrada pelos termopares durante o ensaio confinado conduzido com o GTNcurto para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos: a) Registro completo; b) Destaque para o início do registro.	153
Figura 5.5 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcurto. ...	154
Figura 5.6 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcurto representadas com o tempo em escala logarítmica.	155
Figura 5.7 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcurto, segundo a proposta de Zornberg, Byler e Knudsen (2004).	156
Figura 5.8 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios convencionais conduzidos com GG-PET.	158
Figura 5.9 – Deformação inicial (a) e índice de fluência (b) obtidos nos ensaios convencionais de fluência em função do nível de carregamento aplicado (ensaio com GG-PET).	159
Figura 5.10 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GG-PET em duas temperaturas (43 e 60°C): a) Todos os resultados; b) Resultados selecionados para análise.	160
Figura 5.11 – Aplicação da solicitação de tração nos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GG-PET a 60°C: a) Ensaio descartado (CP-1); b) Ensaio considerado (CP-2).	161
Figura 5.12 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios confinados de fluência conduzidos com GG-PET em temperatura ambiente.	162
Figura 5.13 – Aplicação do carregamento (a) e curva de fluência (b) obtidos a partir do ensaio confinado-acelerado de fluência conduzido com GG-PET a 44,1°C e com corpo de prova confinado em areia e submetido a uma tensão normal igual a 50 kPa.	163

Figura 5.14 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios de fluência conduzidos com GG-PET com carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético.	164
Figura 5.15 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GG-PET com carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético.....	164
Figura 5.16 – Variação do índice de fluência em função da temperatura de ensaio (GG-PET).	166
Figura 5.17 – Variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura para a GG-PET.	167
Figura 5.18 – Curvas mestras de fluência da GG-PET em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa, com corpos de prova submetidos a um carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético.	168
Figura 5.19 – Deformação inicial dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fluência da GG-PET, em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa.....	169
Figura 5.20 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios convencionais conduzidos com GTW.....	170
Figura 5.21 – Deformação inicial (a) e índice de fluência (b) obtidos nos ensaios convencionais de fluência em função do nível de carregamento aplicado (ensaios com GTW).....	171
Figura 5.22 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GTW em duas temperaturas (38 e 62°C).	173
Figura 5.23 – Curva de fluência e leituras das células de carga resultantes do ensaio confinado de fluência conduzido com GTW em temperaturas ambiente.	174
Figura 5.24 – Curva de fluência e leituras das células de carga resultantes do ensaio confinado-acelerado de fluência conduzido com GTW em temperatura igual a 38°C.....	175
Figura 5.25 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios de fluência conduzidos com GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético: a) Escala vertical para visualização de todos os dados; b) Escala vertical ampliada.	176

Figura 5.26 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético: a) Escala vertical para visualização de todos os dados; b) Escala vertical ampliada.	177
Figura 5.27 – Efeito do confinamento em areia nas deformações por fluência do GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético: a) Ensaios em temperatura ambiente; b) Ensaios em temperatura elevada igual a 38°C.....	178
Figura 5.28 – Aplicação da solicitação de tração nos ensaios acelerado (38°C) e acelerado-confinado com o GTW.....	179
Figura 5.29 – Efeito da temperatura de ensaio no índice de fluência do GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético.....	180
Figura 5.30 – Variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura para a GTW.....	180
Figura 5.31 – Curvas mestras de fluência do GTW em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa, com corpos de prova submetidos a um carregamento igual a 30% da resistência à tração do geossintético.....	181
Figura 5.32 – Deformação inicial obtida em cada ensaio de fluência conduzido com o GTW, submetido a um carregamento igual 30% da resistência à tração do material.	182
Figura 5.33 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios convencionais conduzidos com GTNcont.	184
Figura 5.34 – Deformação inicial (a) e índice de fluência (b) obtidos nos ensaios convencionais de fluência em função do nível de carregamento aplicado (ensaio com GTNcont).....	184
Figura 5.35 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GTNcont em duas temperaturas (38 e 58°C).....	186
Figura 5.36 – Curva de fluência e trajetória de carregamento do corpo de prova resultantes do ensaio confinado de fluência conduzido com GTNcont em temperaturas ambiente.....	187

Figura 5.37 – Curva de fluência e trajetória de carregamento do corpo de prova resultantes do ensaio confinado-acelerado de fluência conduzido com GTNcont em temperaturas igual a 38 e 58°C.	188
Figura 5.38 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios de fluência conduzidos com GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.....	189
Figura 5.39 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.....	190
Figura 5.40 – Efeito do confinamento em areia nas deformações por fluência do GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético. .	191
Figura 5.41 – Efeito da temperatura de ensaio no índice de fluência do GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.	192
Figura 5.42 – Variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura para a GTNcont.	192
Figura 5.43 – Curvas mestras de fluência do GTNcont em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa, com corpos de prova submetidos a um carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.....	193
Figura 5.44 – Curvas de fluência da GG-PET obtidas com corpos de prova em isolamento e nível de carregamento igual a 85%.	195
Figura 5.45 – Curva de ruptura por fluência da GG-PET obtidas com corpos de prova em isolamento e resultado do ensaio confinado de ruptura por fluência: a) Escala vertical completa; b) Escala vertical modificada.	197
Figura 5.46 – Curvas de fluência da GG-PET obtidas com corpos de prova em isolamento com diferentes números de elementos submetidos aos esforços de tração. ...	198
Figura 5.47 – Aspecto do corpo de prova empregado no ensaio confinado de ruptura por fluência com a GG-PET.	199
Figura 5.48 – Curvas obtidas a partir de ensaios de ruptura por fluência conduzidos com GG-PP com carregamento entre 60 e 90% da resistência à tração do geossintético: a) Corpos de prova em isolamento; b) Corpos de prova confinados em areia (tensão normal igual a 50 kPa).....	200

Figura 5.49 – Exemplo da obtenção do tempo de ruptura por fluência da GG-PP (ensaio confinado com carregamento igual a 58% da resistência à tração do geossintético).	202
Figura 5.50 – Curvas de ruptura por fluência da GG-PP obtidas com corpos de prova em isolamento e submetidos a tensão normal igual a 50 kPa.	203
Figura 5.51 – Ensaio de tração de faixa larga com corpos de prova submetidos previamente a ensaios de fluência: a) GG-PET, parte 1; b) GG-PET, parte 2; c) GTW, parte 1; d) GTW, parte 2.	205
Figura 5.52 – Resistência residual obtida após diferentes ensaios (tração e fluência): a) GG-PET; b) GTW.	208
Figura 5.53 – Comparação entre as curvas obtidas nos ensaios de tração de faixa larga com corpos de prova virgem e após o ensaio de fluência: a) GG-PET; b) GTW. .	209
Figura 5.54 – Comparação entre os resultados dos ensaios convencionais de fluência com três geossintéticos (GTW, GTNcont e GG-PET) a partir da relação entre o índice de fluência e o nível de carregamento.	210
Figura 5.55 – Efeito do confinamento em areia nos ensaios conduzidos com o GTW com destaque para o paralelismo entre as curvas: a) Ensaio em temperatura ambiente; b) Ensaio em temperatura elevada (38°C).	214
Figura 6.1 – a) Configuração do novo equipamento de fluência em geossintéticos empregada nos ensaios apresentados nesta tese; b) Configuração sugerida para permitir a aplicação uniforme da solicitação de tração nos corpos de prova.	222
Figura 6.2 – Proposta de melhoria do novo equipamento visando a redução do atrito nas regiões reforçadas dos corpos de prova: (a) Configuração empregada no novo equipamento de fluência em geossintéticos; b) Configuração sugerida.	223

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de fator de redução sugeridos por Koerner (2005) para geotêxteis.	81
Tabela 2.2 – Resultados dos ensaios de tração conduzidos com amostras exumadas (NAUGHTON; KEMPTON, 2006).	85
Tabela 3.1 – Coeficientes angulares obtidos na regressão linear das leituras das células de tensão total (montagem sem corpo de prova).	110
Tabela 3.2 – Coeficientes angulares obtidos na regressão linear das leituras das células de tensão total (montagem com corpo de prova).	113
Tabela 3.3 – Resultados do teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento (montagem sem corpo de prova).	116
Tabela 3.4 – Resultados do teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento (montagem com corpo de prova).	117
Tabela 3.5 – Características dos testes realizados para a calibração da temperatura.	120
Tabela 4.1 – Características dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa.	136
Tabela 4.2 – Características dos materiais utilizados como meio confinante.	138
Tabela 4.3 – Características desejadas dos ensaios de fluência realizados com cada geossintético.	141
Tabela 4.4 – Objetivos dos ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento.	142
Tabela 4.5 – Solicitação de tração em cada ensaio realizado no novo equipamento de fluência em geossintéticos.	146
Tabela 5.1 – Duração dos ensaios de fluência conduzidos com GG-PET em temperatura elevada caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).	167
Tabela 5.2 – Duração dos ensaios de fluência conduzidos com GTW em temperatura elevada caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).	181
Tabela 5.3 – Duração dos ensaios de fluência conduzidos com GTNcont em temperatura elevada caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).	193
Tabela 5.4 – Tempos de ruptura por fluência obtidos nos ensaios convencionais conduzidos com GG-PET.	196

Tabela 5.5 – Tempos de ruptura por fluência obtidos nos ensaios conduzidos com GG-PP.	202
Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios de tração de faixa larga realizados após o término dos ensaios de fluência.	206
Tabela 5.7 – Valores considerados na comparação do comportamento em fluência dos geotêxteis não tecidos a partir dos ensaios convencionais.	216
Tabela 5.8 – Valores considerados na comparação da influência do confinamento em areia no comportamento em fluência do GTNcurto.....	217
Tabela 5.9 – Valores considerados na comparação da influência do confinamento em areia no comportamento em fluência do GTNcont.	217

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
C.V.	Coeficiente de variação
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FHWA	Federal Highway Administration
ISSO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
TD-1; TD-2	Transdutores de deslocamento 1 e 2
TP-1	Termopar 1, localizado no compartimento inferior da câmara de ensaio
TP-2	Termopar 2, localizado no compartimento superior da câmara de ensaio
USP	Universidade de São Paulo
WLF	Equação desenvolvida por Williams, Landel e Ferry (1955)

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_0	Deformação inicial
ε_f	Deformação por fluência
ε_1	Deformação na fase primária da fluência
ε_2	Deformação na fase secundária da fluência
ε_3	Deformação na fase terciária da fluência
F	Solicitação de tração aplicada aos modelos mecânicos
E_1 e E_2	Módulo de deformabilidade para deformações elásticas das molas empregadas nos modelos mecânicos
η	Viscosidade do amortecedor empregado nos modelos mecânicos
R_1 e R_2	Módulo de deformabilidade para deformações plásticas dos elementos plásticos empregados nos modelos mecânicos
ε_∞	Deformação em tempo infinito
$\Delta\varepsilon$	Variação da deformação do corpo de prova devido ao descarregamento
ε_{res}	Deformação permanente (residual) após descarregamento
ε	Deformação total
t	Tempo decorrido
a, b	Constantes de ajuste logarítmico das curvas de fluência
T_α	Índice de fluência
t_0	Tempo decorrido no final da aplicação do carregamento
$\varepsilon_{1-1}, \varepsilon_{1-2}, \dots, \varepsilon_{1-n}$	Deformações dos corpos de prova quando o tempo é igual a $t_1, t_2, \dots, t_n$ com níveis de carregamento iguais a $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$
$Q_1, Q_2, \dots, Q_n$	Níveis de carregamento para construção de curvas isócronas de fluência
$t_1, t_2, \dots, t_n$	Tempo considerado na construção de curvas isócronas
T_0	Temperatura de referência
T_1 e T_2	Temperaturas quaisquer
$\dot{\varepsilon}_1$ e $\dot{\varepsilon}_2$	Taxas de deformação associadas a T_1 e T_2 , respectivamente
E	Energia de ativação
R	Constante universal dos gases

T	Temperatura absoluta, em Kelvin
a_T	Fator de translação (<i>Shift factor</i>)
t_T	Tempo necessário para que um determinado processo ocorra na temperatura T (elevada)
t_R	Tempo necessário para que um determinado processo ocorra na temperatura de referência T_0
$T_{\text{fluência}}$	Solicitação máxima a que o geossintético pode ser submetido em durante a vida útil da obra segundo a curva de ruptura por fluência
N	Número de estágios empregados na calibração do sistema de aquecimento
ΔT	Incremento de temperatura entre os estágios empregados na calibração do sistema de aquecimento
d_A e d_B	Leituras dos transdutores de deslocamento
ℓ_i	Distância inicial entre os pontos de fixação dos fios inextensíveis
$T_{\alpha,i}$	Índice de fluência do ensaio com temperatura elevada
$T_{\alpha,R}$	Índice de fluência do ensaio na temperatura de referência
T_i	Temperatura elevada na qual o ensaio acelerado foi conduzido
$t_{1\%,i}$	Tempo necessário para que uma deformação unitária ocorra em temperatura elevada
$t_{1\%,R}$	Tempo necessário para que uma deformação unitária ocorra na temperatura de referência
t_R	Duração de um ensaio acelerado se fosse conduzido na temperatura de referência
t_i	Duração real do ensaio em temperatura elevada
C_1 e C_2	Constantes empíricas empregadas na Equação WLF (William, Landel e Ferry, 1955)

SUMÁRIO

1. Introdução	37
1.1. Objetivos.....	38
1.2. Organização do texto.....	39
2. Revisão Bibliográfica	40
2.1. Fluência em geossintéticos	40
2.2. Modelo mecânico da fluência em geossintéticos.....	42
2.3. Representação gráfica da fluência em geossintéticos.....	44
2.4. Fatores que afetam a fluência em geossintéticos	49
2.4.1. Tipo de geossintético.....	50
2.4.2. Tipo de polímero	51
2.4.3. Influência conjunta do tipo de geossintético e de polímero	53
2.4.4. Nível de carregamento.....	55
2.4.5. Velocidade de aplicação do carregamento	55
2.4.6. Temperatura	59
2.4.7. Confinamento em solo.....	61
2.4.8. Sinergia com alguns tipos de degradação.....	63
2.5. Ensaio para determinação do comportamento em fluência sob tração dos geossintéticos.....	65
2.5.1. Ensaio acelerados de fluência em geossintéticos	69
2.5.2. Ensaio confinados de fluência em geossintéticos.....	77
2.6. Fluência dos geossintéticos em projetos de solo reforçado.....	80
2.7. Considerações finais.....	86
3. Desenvolvimento do equipamento	88
3.1. Concepção inicial.....	88
3.2. Alterações na configuração inicial do equipamento	90
3.2.1. Pesos livres	90
3.2.2. Garras	93
3.2.3. Medição do alongamento dos corpos de prova.....	94
3.2.4. Câmara de ensaio	95
3.2.5. Configuração dos corpos de prova.....	96

3.3. Configuração final do equipamento	100
3.3.1. Corpos de prova	101
3.3.1.1. Verificação da resistência ao cisalhamento de interface entre as superfícies lisas das geomembranas e os corpos de prova	103
3.3.2. Sistema para reprodução do confinamento	105
3.3.2.1. Verificações do sistema para reprodução do confinamento	107
3.3.2.1.1. Tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios preenchida apenas com areia.....	107
3.3.2.1.2. Tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios em montagem completa (areia e corpo de prova)	111
3.3.2.1.3. Tensões horizontais totais e coeficiente de empuxo no repouso	114
3.3.2.1.4. Estabilidade do sistema de reprodução do confinamento	115
3.3.3. Sistema de aquecimento	117
3.3.3.1. Verificação da temperatura ambiente.....	121
3.3.4. Sistema de aplicação da solicitação de tração.....	121
3.3.5. Sistema para medição do alongamento do corpo de prova.....	124
3.3.6. Sistema de aquisição dos dados	127
3.4. Montagem do ensaio.....	128
3.4.1. Preenchimento da câmara de ensaio.....	129
3.4.2. Fixação do corpo de prova às garras do equipamento.....	131
3.4.3. Ajuste da temperatura de ensaio	131
3.4.4. Aplicação do carregamento constante	132
3.5. Desmontagem do ensaio	133
4. Materiais e Métodos	135
4.1. Geossintéticos empregados.....	135
4.2. Meio confinante	137
4.3. Descrição dos ensaios realizados	140
5. Resultados e Discussão	147
5.1. Ensaio para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos	147
5.1.1. Sistema de carregamento	148
5.1.2. Sistema de aquecimento	150
5.1.3. Desempenho geral do equipamento	153

5.2. Ensaio para avaliação do comportamento em deformação por fluência sob tração ..	157
5.2.1. Geogrelha biaxial de poliéster (GG-PET)	157
5.2.1.1. Ensaio convencionais de fluência	158
5.2.1.2. Ensaio não convencionais de fluência	159
5.2.1.2.1. Ensaio acelerados de fluência	160
5.2.1.2.2. Ensaio confinados de fluência	162
5.2.1.2.3. Ensaio confinado-acelerado de fluência	162
5.2.1.3. Análise dos resultados – GG-PET	163
5.2.2. Geotêxtil tecido de polipropileno (GTW)	169
5.2.2.1. Ensaio convencionais de fluência	170
5.2.2.2. Ensaio não convencionais de fluência	172
5.2.2.2.1. Ensaio acelerados de fluência	172
5.2.2.2.2. Ensaio confinado de fluência	173
5.2.2.2.3. Ensaio confinado-acelerado de fluência	174
5.2.2.3. Análise dos resultados – GTW	175
5.2.3. Geotêxtil não tecido de poliéster, com filamentos contínuos (GTNcont)	183
5.2.3.1. Ensaio convencionais de fluência	183
5.2.3.2. Ensaio não convencionais de fluência	185
5.2.3.2.1. Ensaio acelerados de fluência	186
5.2.3.2.2. Ensaio confinado de fluência	187
5.2.3.2.3. Ensaio confinado-acelerados de fluência	188
5.2.3.3. Análise dos resultados – GTNcont	189
5.3. Ensaio para avaliação do comportamento na ruptura por fluência sob tração	194
5.3.1. Geogrelha de poliéster (GG-PET)	194
5.3.2. Geogrelha de polipropileno (GG-PP)	199
5.4. Resistência residual dos geossintéticos	204
5.5. Considerações adicionais	209
5.5.1. Comportamento em fluência dos geossintéticos estudados	210
5.5.1.1. Geogrelhas	212
5.5.1.2. Geotêxtil tecido	213
5.5.1.3. Geotêxteis não tecidos (GTNcurto e GTNcont)	215
5.5.2. Desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos	217
5.5.2.1. Verificações durante o desenvolvimento do novo equipamento	218

5.5.2.2. Verificações após o desenvolvimento do novo equipamento	218
5.5.2.3. Verificações do novo equipamento a partir de ensaios	219
6. Implementações no novo equipamento e pesquisas futuras	221
6.1. Aplicação da solicitação de tração	221
6.2. Redução do atrito na região reforçada dos corpos de prova	222
6.3. Medição da solicitação de tração na faixa de interesse dos corpos de prova e cálculo das deformações	224
6.4. Sistema contra interrupções no fornecimento de energia elétrica	225
6.5. Cabos de aço e suas conexões	225
6.6. Sugestões para pesquisas subsequentes	226
7. Conclusões	229
REFERÊNCIAS¹	234
APÊNDICE A: Informações sobre os ensaios de fluência conduzidos nesta pesquisa.....	243
APÊNDICE B – Solicitação de tração e temperatura atingidas nos ensaios conduzidos nesta pesquisa	249
APÊNDICE C – Índice de fluência, deformação inicial e resultados dos ensaios de tração após períodos de fluência obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa	255

1. Introdução

O comportamento de longo prazo dos geossintéticos encontra-se entre as propriedades mais relevantes no projeto de estruturas que empregam esses materiais com a função de reforço. Esse comportamento pode ser representado pela propriedade de fluência, que é comumente caracterizada a partir de ensaios normalizados de baixa complexidade. Tais ensaios são realizados em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar com amostras isoladas, i.e. sem contato com solo. Apesar de ser amplamente empregado nos âmbitos acadêmico e profissional, dois aspectos negativos se destacam nesse tipo de ensaio. Em primeiro lugar, os ensaios normalizados de fluência em geossintéticos possuem uma grande duração, podendo atingir até 10.000 horas. O segundo aspecto está relacionado à falta de interação solo-geossintético, que pode levar à obtenção de resultados conservadores. A união desses fatores pode resultar em ensaios com custos elevados e que fornecem parâmetros que irão contribuir para o aumento dos custos de construção da referida obra.

Medidas simples podem ser empregadas para contornar os aspectos mencionados anteriormente. Ensaios conduzidos em temperaturas elevadas (i.e. ensaios acelerados de fluência) podem ser usados para acelerar a caracterização da fluência dos geossintéticos. A partir deles, as deformações ocorridas em temperaturas elevadas podem ser interpretadas como deformações em temperatura ambiente, numa escala de tempo diferente, mais extensa. Assim, ensaios de curta duração com temperatura elevada podem ser usados para verificar o comportamento em fluência do material em longo prazo sob temperatura ambiente.

O comportamento em fluência dos geossintéticos pode ser afetado pela presença de tensões confinantes. Assim, a utilização de câmaras especiais que aplicam tensões normais ao plano dos corpos de prova são empregadas em ensaios modificados de fluência que consideram esse aspecto (ensaios confinados de fluência). Em muitos casos, essas câmaras utilizam solos compactados para reproduzir a interação solo-geossintético e produzir resultados que simulem essa condição.

Diversos estudos publicados aplicaram essas medidas para contornar os dois principais aspectos negativos dos ensaios convencionais de fluência em geossintéticos. Essas metodologias podem ser consideradas como implementações simples de serem realizadas, mas apenas quando empregadas individualmente. A determinação do comportamento em fluência dos geossintéticos a partir de ensaios simultaneamente confinados e acelerados, por

sua vez, apresenta um grande potencial para a mitigação dos dois aspectos negativos principais inerentes ao estudo da fluência nesses materiais a partir de ensaios convencionais (duração dos ensaios e falta de interação solo-geossintético). Assim, um novo equipamento foi desenvolvido nesta pesquisa com o propósito de possibilitar a execução de ensaios confinado-acelerados de fluência em geossintéticos. Esse novo equipamento possui aplicação imediata e possibilita a criação de uma metodologia inovadora para considerar um dos aspectos mais controversos no projeto de estruturas de reforço de solo com geossintéticos.

1.1. Objetivos

Embora os estudos acerca do comportamento em fluência dos geossintéticos tenham ampla divulgação e utilidade, ainda são necessárias implementações aos ensaios normalizados de forma a considerar seus principais aspectos negativos. Na intenção de contribuir para a realização de ensaios mais adequados à prática atual de projetos, este estudo teve os seguintes objetivos específicos:

- a) Projetar e desenvolver um equipamento que possibilite a realização de ensaios simultaneamente confinados e acelerados de fluência em geossintéticos. Adicionalmente, esse equipamento deve ser capaz de realizar ensaios acelerados e ensaios confinados de fluência, separadamente. Salienta-se que esse é o objetivo principal desta pesquisa.
- b) Verificar o funcionamento dos elementos individuais do novo equipamento a partir de calibrações em cada sistema que o compõe, bem como do seu desempenho global por meio de ensaios conduzidos com a montagem padrão estabelecida.
- c) Realizar ensaios com geossintéticos de diferentes tipos, comumente empregados com a função de reforço, utilizando diferentes condições, e compará-los com ensaios normalizados de fluência.
- d) Discutir os resultados obtidos frente àqueles encontrados a partir de ensaios normalizados para a consideração do fenômeno da fluência em geossintéticos.

Esta pesquisa foi conduzida em duas instituições de ensino superior diferentes. O desenvolvimento do equipamento e os respectivos ensaios e verificações foram realizados na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). A análise dos resultados obtidos, por sua vez, foi executada tanto na EESC/USP como na University of Texas at Austin, EUA.

1.2. Organização do texto

Esta tese foi dividida de maneira a facilitar o entendimento do leitor em relação ao desenvolvimento do novo equipamento de fluência em geossintéticos e os ensaios realizados. Assim, além deste capítulo, o trabalho foi dividido em mais cinco capítulos. O Capítulo 2 esclarece a fluência em geossintéticos, tratando dos principais aspectos relacionados a esse fenômeno. O Capítulo 3, por sua vez, apresenta o desenvolvimento do novo equipamento, juntamente com as verificações dos seus elementos individuais e dos seus sistemas. São destacadas, ainda, as principais dificuldades encontradas durante esses processos. Os materiais empregados e os ensaios realizados são descritos no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos diferentes tipos de ensaios de fluência conduzidos nesta pesquisa e suas respectivas discussões. Em seguida, o Capítulo 6 apresenta sugestões para implementações a serem realizadas no novo equipamento e para pesquisas subsequentes. Por fim, o Capítulo 7 expõe as principais conclusões obtidas neste estudo.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma contextualização geral do fenômeno de fluência em geossintéticos com o propósito de esclarecer os principais pontos abordados nesta pesquisa. Assim, são explicados os fundamentos conceituais pertinentes à fluência, juntamente com suas representações gráficas e modelos mecânicos. Em seguida, discorre-se sobre os efeitos de diversos aspectos na fluência de geossintéticos e apresentam-se os ensaios conduzidos para a determinação desse comportamento. Ao término deste capítulo, são esclarecidos os métodos empregados para considerar esse fenômeno em projetos de obras nas quais os geossintéticos assumem a função de reforço.

2.1. Fluência em geossintéticos

Diversos materiais caracterizam-se por apresentar o comportamento tensão-deformação dependente do tempo. Em relação a esse aspecto, dois comportamentos distintos são comumente identificados: a fluência e a relaxação de tensões. Denomina-se fluência o fenômeno no qual um dado material sofre deformações ao longo do tempo quando submetido a um carregamento constante. A relaxação de tensões, por sua vez, é caracterizada por uma redução no carregamento ao qual um determinado material está submetido quando a sua deformação é impedida e permanece constante com o tempo.

A fluência e a relaxação de tensões decorrem da natureza viscoelástica dos materiais. Essas propriedades são nulas ou de pequena importância em muitos casos (FERRY, 1980). Os polímeros, por outro lado, apresentam um comportamento viscoelástico significativo quando submetidos a uma dada solicitação e são, portanto, considerados materiais sensíveis a esses fenômenos. Assim, o estudo dessas propriedades nos polímeros serve para caracterizar o comportamento tensão-deformação dependente do tempo desses materiais (LESHCHINSKY et al., 1997; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, 2005). Por esse motivo, Koerner (2005) afirma que os geossintéticos devem ser caracterizados em relação a esse parâmetro.

Apesar da possibilidade da ocorrência de relaxação de tensões nos geossintéticos empregados com a função de reforço, Costa (2004) cita que a caracterização do comportamento tensão-deformação dependente do tempo tem sido comumente realizada

através de ensaios de fluência. Becker e Nunes (2002) destacam ainda que o desempenho referente à fluência dos geossintéticos é uma das propriedades mais importantes para a determinação da resistência de projeto de obras de solo reforçado.

Bueno, Constanzi e Zornberg (2005) destacam que a fluência dos geossintéticos pode ocorrer tanto no âmbito molecular como na esfera macroscópica, delimitando a fluência intrínseca e a fluência estrutural, respectivamente. Assim, a fluência intrínseca está relacionada à extensão das fibras poliméricas formadoras do geossintético e a fluência estrutural, ao escorregamento relativo entre elas. Apesar de ambos os aspectos serem percebidos, o estudo da fluência de geossintéticos para usos de engenharia geotécnica é comumente conduzido a partir de ensaios normalizados que refletem principalmente o aspecto macroscópico desse fenômeno.

As deformações por fluência nos geossintéticos apresentam-se divididas em três fases. Essa divisão é exemplificada na Figura 2.1 com o resultado de um ensaio de fluência conduzido com um geotêxtil tecido de polipropileno submetido a uma solicitação de tração igual a 67% de sua resistência. Salienta-se que este ensaio foi realizado com carregamento orientado no sentido transversal de fabricação do geossintético.

Figura 2.1 – Exemplo das fases da fluência de geossintéticos através do resultado obtido com um geotêxtil tecido de polipropileno submetido a uma solicitação de tração igual a 67% de sua resistência, no sentido transversal de fabricação.

Ao serem submetidos a um carregamento, os geossintéticos apresentam uma deformação imediata, de caráter elástico (ϵ_0). Caso essa solicitação seja mantida, as deformações por fluência (ϵ_f) se processarão nesse material. Essas deformações são

permanentes e possuem três fases, caracterizadas pela variação na taxa de deformação por fluência. A fluência primária constitui a primeira parte da curva de fluência apresentada na Figura 2.1 e possui como principal característica um decréscimo nos valores de taxa de deformação por fluência. As deformações ocorridas nessa fase (ε_1) apresentam-se altamente não-lineares quando o tempo é expresso em escala natural. Por outro lado, tais deformações se mostram num padrão aproximadamente linear numa representação com tempo em escala logarítmica. Costa (1999) afirma ainda que a fluência primária depende principalmente da estrutura macroscópica do geossintético.

A fase seguinte exibida pelas deformações por fluência em geossintéticos é a secundária (ε_2). Em contraste à fluência primária, essa fase caracteriza-se por valores de taxa de deformação por fluência praticamente constantes e por apresentar-se praticamente linear tanto na representação do tempo em escala natural como em escala logarítmica. A fluência terciária (ε_3) é a última fase identificada na Figura 2.1. Ela é caracterizada por um incremento brusco na taxa de deformação por fluência, o que pode levar à ruptura do geossintético, e sua representação gráfica apresenta-se curvilínea para ambas as escalas de tempo (natural e logarítmica). Diferentemente da fluência primária, as parcelas referentes às fases secundária e terciária das deformações por fluência dependem principalmente do tipo do polímero (ALLEN, 1991).

2.2. Modelo mecânico da fluência em geossintéticos

Os modelos mecânicos utilizam uma série de elementos (e.g. molas e amortecedores) para representar o comportamento dos materiais e são frequentemente utilizados para simular suas propriedades viscoelásticas. A maior vantagem desse tipo de representação é a possibilidade de inferir o comportamento de um material a partir de uma análise visual de um modelo apropriado (ROSCOE, 1950).

O modelo mecânico mais simples para representar as deformações dependentes do tempo dos geossintéticos é mostrado na Figura 2.2a (DEAN; BROUGHTON, 2007), em que F é a solicitação de tração aplicada ao modelo. Este, por sua vez, corresponde à curva tempo-deformação ilustrada na Figura 2.2b e é definido por dois elementos básicos ligados em série: uma mola, definida pelo módulo de deformabilidade referente às deformações elásticas E_1 , e um sistema Kelvin, composto por uma mola com módulo de deformabilidade referente às deformações elásticas E_2 e um amortecedor com viscosidade η , ligados em paralelo. As

propriedades reológicas de alguns geossintéticos até um período de tempo limitado podem ser representadas por esse modelo (SAWICKI; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, 1998). A partir do modelo ilustrado na Figura 2.2, uma solicitação de tração aplicada a um corpo de prova de geossintético provocaria uma deformação elástica imediata que é função do módulo de deformabilidade E_1 . Em seguida, caso o carregamento seja mantido, ocorrem deformações por fluência relacionadas à viscosidade η e ao módulo de deformabilidade E_2 .

Figura 2.2 – Representação das deformações dependentes do tempo nos geossintéticos: a) Modelo mecânico; b) Representação gráfica obtida a partir desse modelo (adaptada de DEAN; BROUGHTON, 2007 e SAWICKI, 1999).

Sawicki e Kazimierowicz-Frankowska (1998) alegam que as curvas de fluência de geossintéticos não se aproximam de uma assíntota para os níveis de tensão típicos da engenharia geotécnica. Adicionalmente, esses autores discorrem sobre diversos modelos mecânicos para representar a fluência sob condições não convencionais de ensaio, e.g. aumento ou redução do carregamento após um dado nível de deformações por fluência. Como proposta final, sugerem um modelo mecânico composto por cinco elementos: duas molas (módulo de deformabilidade E_1 e E_2); dois elementos plásticos (módulos de deformabilidade referentes a deformações plásticas R_1 e R_2); e um amortecedor (a viscosidade η) (Figura 2.3a). A curva tempo-deformação resultante deste modelo é delineada na Figura 2.3b.

A partir do modelo apresentado na Figura 2.3, pode-se perceber que um dado carregamento provoca uma deformação imediata (ϵ_0), composta por uma parcela elástica (E_1) e outra plástica (R_1). Caso o carregamento persista, as deformações dependentes do tempo se processam, sob influência da viscosidade η , e serão também constituídas por uma componente elástica (E_2) e uma plástica (R_2). Se houver uma redução na tensão aplicada, a mola caracterizada por E_1 responderá imediatamente, produzindo uma diminuição nas deformações do material. O elemento plástico (R_1), contudo, não apresenta nenhuma resposta, uma vez que

representa deformações plásticas, irreversíveis. Em seguida, a mola definida por E_2 começará a responder a esta redução no carregamento com o tempo, devido ao elemento com viscosidade η . O elemento plástico R_2 não apresentará resposta.

Figura 2.3 – a) Modelo mecânico modificado; b) Representação gráfica para o comportamento previsto por esse modelo (adaptado de SAWICKI; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, 1998).

2.3. Representação gráfica da fluência em geossintéticos

A fluência dos geossintéticos é comumente representada por meio de um gráfico que relaciona as deformações dos corpos de prova com o tempo de ensaio a partir do início da aplicação do carregamento. Nele, o tempo é comumente plotado em escala logarítmica. A Figura 2.4 exemplifica essa representação gráfica com o resultado do ensaio de fluência conduzido com um geotêxtil tecido de polipropileno submetido a uma solicitação de tração igual a 67% de sua resistência, ilustrado previamente na Figura 2.1. Salienta-se que o corpo de prova empregado no ensaio mostrado na Figura 2.4 rompeu após aproximadamente nove horas de ensaio.

Figura 2.4 – Representação gráfica comumente utilizada em estudos de fluência de geossintéticos (tempo em escala logarítmica).

Como citado anteriormente, o trecho linear da representação gráfica dos resultados em escala logarítmica de tempo corresponde às fases primária e secundária da fluência. Assim, essas fases da fluência em geossintéticos podem ser representadas pela Equação 1.

$$\varepsilon = a \cdot \log t + b \quad \text{Equação 1}$$

onde ε é a deformação total do corpo de prova, t é o tempo decorrido de ensaio e a e b são constantes empregadas para realizar o ajuste linear dos dados em escala semi-logarítmica.

Embora a representação gráfica mostrada na Figura 2.4 seja amplamente utilizada na literatura técnica, ela ilustra apenas as deformações totais do corpo de prova. Assim, as deformações iniciais e as deformações por fluência são apresentadas em uma única grandeza e, portanto, dificulta-se a visualização do efeito que algum parâmetro possa ter no comportamento em fluência dos geossintéticos, especificamente. Assim, as deformações totais obtidas em um ensaio genérico de fluência em geossintéticos podem ser representadas pela Equação 2.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_f \quad \text{Equação 2}$$

onde ε é a deformação total do corpo de prova, ε_0 é a deformação inicial devido à aplicação do carregamento e ε_f é a deformação por fluência. As deformações iniciais (ε_0) dos corpos de prova são comumente tomadas no final da aplicação do carregamento, quando é atingida solicitação de tração desejada para o respectivo ensaio. Nesse momento o tempo é considerado como tempo inicial (t_0). As deformações por fluência (ε_f) referem-se, por sua vez, à diferença entre as deformações totais calculadas ao longo do ensaio e a deformação inicial, obtida no término da aplicação do carregamento.

Com o propósito de isolar as deformações por fluência dos geossintéticos daquelas ocorridas devido à aplicação do carregamento, Zornberg, Byler e Knudsen (2004) propuseram uma nova representação das deformações obtidas nos ensaios de fluência com geossintéticos. Esses autores relatam que as deformações por fluência (ε_f) podem ser caracterizadas pela inclinação do trecho linear das curvas de fluência, nomeada como índice de fluência (T_α), e determinada através da Equação 3.

$$\varepsilon_f = T_\alpha \log_{10} \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad \text{Equação 3}$$

onde ε_f é a deformação por fluência, T_α é o índice de fluência, t é um valor de tempo arbitrário e t_0 é o tempo no final da aplicação do carregamento.

O índice de fluência representa, portanto, a velocidade com que as deformações por fluência ocorrem em um determinado geossintético. Em outras palavras, o índice de fluência é igual à taxa de deformação por fluência do material. Dessa forma, a comparação desse parâmetro obtido em diferentes condições permite visualizar a influência de cada situação na fluência do geossintético. Zornberg, Byler e Knudsen (2004) destacam ainda que essa abordagem é mais adequada para quantificar a resposta em fluência dos geossintéticos a serem aplicados em estruturas reais. A Figura 2.5 exemplifica a representação gráfica proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004) utilizando o mesmo conjunto de dados apresentados na Figura 2.4.

Figura 2.5 – Representação gráfica das deformações por fluência proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004).

Outra representação bastante empregada nos estudos sobre a fluência dos geossintéticos é formada por curvas isócronas, que relacionam as deformações do material com o carregamento aplicado, para um tempo pré-determinado. Assim, é necessário que uma série de ensaios de fluência seja conduzida com o mesmo geossintético. Comumente, os níveis de carregamento empregados nesses ensaios variam entre 10 e 60% da resistência à tração do geossintético (VERTEMATI, 2004; KOERNER, 2005). A Figura 2.6 ilustra o procedimento para o traçado das curvas isócronas.

Figura 2.6 – Procedimento para o traçado das curvas isócronas: a) Curva tempo-deformação; b) Curva deformação-carregamento aplicado.

O procedimento para obtenção das curvas isócronas é iniciado a partir da consideração de um valor de tempo de ensaio qualquer, t_1 . Verificam-se as deformações que os corpos de prova atingiram ($\epsilon_{1-1}, \epsilon_{1-2}, \epsilon_{1-3}, \dots, \epsilon_{1-n}$) quando o tempo de ensaio é igual a t_1 em cada um dos diferentes níveis de carregamento empregados ($Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$) (Figura 2.6a). Esses valores são plotados no gráfico de carregamento aplicado *versus* deformação. Esse procedimento é repetido para os demais tempos de ensaio desejados ($t_2, t_3, \dots, t_n$) (Figura 2.6b).

As curvas isócronas podem ser utilizadas no dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos para determinar a solicitação de tração máxima a qual os geossintéticos podem estar submetidos durante a vida útil da obra. Essa abordagem relaciona a deformação máxima desejada na estrutura com sua vida útil e, por meio da curva isócrona referente a este valor de tempo de ensaio, estabelece o carregamento máximo a ser aplicado ao geossintético.

Os ensaios de fluência realizados com níveis de carregamento mais elevados (e.g. 60 a 90% da resistência à tração do geossintético) buscam determinar o comportamento do material na ruptura por fluência sob tração. Esses ensaios são, portanto, denominados ensaios de ruptura por fluência e são empregados para se determinar o tempo necessário para que ocorra a ruptura do corpo de prova em cada nível de carregamento. Em seguida, esses valores são utilizados na construção gráfica exemplificada na Figura 2.7, que relaciona o tempo de ruptura com o carregamento aplicado. Essa curva assume um aspecto linear quando plotada com o tempo para ruptura em escala logarítmica. Salienta-se que foi empregado o termo carregamento relativo na Figura 2.7b para referir-se a uma porcentagem da resistência à tração do geossintético.

Figura 2.7 – Exemplo da obtenção da curva de ruptura por fluência: a) Curva tempo-deformação; b) Curva de ruptura por fluência.

No exemplo da Figura 2.7, obteve-se um valor de tempo para ruptura por fluência em cada nível de carregamento, entre 60 e 90% ($t_{60\%}$ a $t_{90\%}$) (Figura 2.7a). Esses valores foram empregados em outro gráfico, que relaciona o logaritmo do tempo de ensaio com o carregamento relativo, referido a uma porcentagem da resistência à tração do geossintético. Nesse novo gráfico são inseridos os valores dos níveis de carregamento com seus respectivos valores de tempo para ruptura (Figura 2.7b). A união desses pontos permite, por fim, a elaboração da curva de ruptura por fluência do referido geossintético.

Embora a elaboração das curvas de ruptura por fluência apresente-se como um procedimento simples, a definição da ruptura do geossintético pode levar a diferentes resultados. Os valores de tempo de ruptura por fluência são comumente relacionados ao tempo para que haja o rompimento do corpo de prova (VERTEMATTI, 2004). Por outro lado,

Zornberg, Byler e Knudsen (2004) sugerem que a determinação da ruptura deve estar baseada no momento em que a curva de fluência desvia do comportamento linear na representação semi-logarítmica, exemplificada na Figura 2.4. Esses autores relatam que essa abordagem resultou num critério de ruptura mais objetivo em relação à identificação do tempo e da deformação que levam o material à ruptura. Como exemplo da diferença que pode haver entre as duas abordagens, cita-se o resultado ilustrado na Figura 2.4. O tempo para a ruptura real do corpo de prova foi igual a 8,98 horas. Quando o critério de ruptura proposto por Zornberg, Byler e Knudsen (2004) é empregado, este valor se reduz para cerca de 0,50 horas.

2.4. Fatores que afetam a fluência em geossintéticos

Os geossintéticos apresentam um comportamento tensão-deformação termo-visco-elasto-plástico e que ainda pode depender da direção do carregamento, do tipo de sollicitação e da tensão normal resultante do confinamento em solo (PERKINS, 2000). A Figura 2.8 exemplifica algumas dessas influências.

Figura 2.8 – Exemplos da variação do comportamento tensão-deformação de geossintéticos devido a diferentes fatores: a) Comportamento tensão-deformação elasto-plástico típico em geossintéticos; b) Dependência da temperatura e da velocidade de aplicação do carregamento; c) Dependência da direção de carregamento; d) Exemplo da aplicação de carregamento cíclico (adaptado de PERKINS, 2000).

O comportamento tensão-deformação elasto-plástico é ilustrado esquematicamente na Figura 2.8a, onde se verifica a ocorrência de deformações reversíveis e permanentes. Além disso, pode-se perceber uma resposta não-linear durante o carregamento e uma rigidez mais elevada durante o ciclo de descarregamento-recarregamento. A Figura 2.8b exemplifica a dependência da temperatura e da velocidade de aplicação do carregamento. Temperaturas mais baixas e/ou carregamentos aplicados mais rapidamente induzem a maiores valores de rigidez do geossintético. A direção de carregamento (Figura 2.8c) e o acúmulo de deformações plásticas com a aplicação de ciclos de carregamento (Figura 2.8d) podem influir sobre o comportamento tensão-deformação do geossintético.

De maneira similar, o comportamento em fluência dos geossintéticos apresenta-se dependente de diversos aspectos. A seguir são descritos os principais fatores afetam a propriedade de fluência desses materiais.

2.4.1. Tipo de geossintético

O desenvolvimento das deformações por fluência depende do tipo de geossintético e da sua forma de fabricação. De maneira geral, entre os materiais mais utilizados para reforço de solos, os geotêxteis não-tecidos mostram-se mais susceptíveis ao fenômeno da fluência, seguidos pelo geotêxteis tecidos e pelas geogrelhas. Conforme citado anteriormente, parte das deformações devido à fluência dos geossintéticos ocorre devido a um rearranjo estrutural macroscópico das fibras que compõem o material. Portanto, os geossintéticos com maior grau de liberdade entre as fibras (e.g. geotêxteis não-tecidos agulhados) apresentam as maiores deformações por fluência. Por outro lado, aqueles com fibras – ou elementos – unidas (e.g. geogrelhas soldadas) são menos sensíveis à fluência.

A resposta em fluência desses materiais pode variar ainda em um mesmo tipo de geossintético, pois o processo de fabricação pode ter um efeito significativo. Den Hoedt (1986) explica essas diferenças para o caso dos geotêxteis tecidos. Esse autor cita que os esses materiais possuem fibras que são raramente retilíneas e alinhadas com o sentido do carregamento. Assim, a extensão devido à aplicação de um carregamento em uma direção está correlacionada a uma contração na direção perpendicular. A Figura 2.9 ilustra esse aspecto.

Figura 2.9 – Deformação das fibras de um geotêxtil tecido submetido a uma solicitação de tração: a) Sentido longitudinal à aplicação do carregamento; b) Sentido transversal à aplicação do carregamento (adaptado de DEN HOEDT, 1986).

Den Hoedt (1986) exemplifica também a influência do método de fabricação dos geotêxteis não tecidos na fluência do material. Ilustra-se essa situação por meio da avaliação das deformações por fluência em geotêxteis não-tecidos agulhados e termoligados. Devido à rigidez proporcionada pelas ligações entre as fibras no geotêxtil não-tecido termoligado, a sua susceptibilidade à fluência é menor que nos agulhados. Essas diferenças também podem ser percebidas em geogrelhas. Jeon et al. (2006), por exemplo, avaliaram diversos parâmetros de diferentes tipos de geogrelhas, duas delas compostas por dois polímeros (polietileno de alta densidade com fibras de poliéster) e produzidas com processos de fabricação diferentes (extrudada e extrudada/tecida). Esses autores apontam os limites para deformações por fluências desses materiais iguais a 9,6% e 14,6%, respectivamente, quando submetidos a 60% da resistência à tração.

2.4.2. Tipo de polímero

Os geossintéticos comumente utilizados para reforço de solo – geogrelhas e geotêxteis – são compostos basicamente por quatro tipos de polímeros: poliamida (PA), polietileno (PE), polipropileno (PP) e politereftalato de etileno (PET). A poliamida (PA) também é conhecida como náilon e o PET é usualmente referido como poliéster. Esses e os demais polímeros são formados por macromoléculas de cadeias longas que podem estar distribuídas de forma ordenada no espaço. Essa distribuição ordenada da matéria no espaço, com repetição regular de grupos atômicos ou moleculares é denominada cristalinidade e depende da estrutura química, do peso molecular e do tratamento físico a que o material foi

submetido (MANO; MENDES, 1999). Assim, os polímeros podem possuir regiões cristalinas e não cristalinas, também denominadas amorfas, simultaneamente. Por esse motivo, a cristalinidade de um polímero é geralmente medida em porcentagem, definida como grau de cristalinidade. Em geral, o poliéster possui grau de cristalinidade menor (30 a 40%) que as poliolefinas (polipropileno: 70 a 80%; polietileno: 75 a 85%) (DEN HOEDT, 1986). Salienta-se que as poliolefinas são polímeros que tem como monômero uma olefina simples, que possui fórmula geral C_nH_{2n} .

O comportamento tensão-deformação de curto prazo dos geossintéticos é significativamente determinado por deformações das regiões não-cristalinas. Por outro lado, a porção cristalina passa a ter um papel mais expressivo nos carregamentos de longo prazo. Por essa razão, o grau de cristalinidade do polímero que compõe o referido geossintético apresenta-se como um aspecto a ser considerado no estudo da fluência desse material.

Além do grau de cristalinidade, é importante entender como a estrutura molecular afeta o comportamento em fluência dos polímeros. Por exemplo, as poliolefinas (e.g. polietileno e polipropileno) são frequentemente formadas por cadeias lineares que não possuem ligações cruzadas, ao contrário do poliéster, que possui uma estrutura mais intrincada, com a presença dessas ligações. Essa estrutura das moléculas dos polímeros reflete-se nas deformações por fluência do material. No caso das poliolefinas, é mais plausível que haja escorregamento entre as moléculas decorrente de um carregamento de longo prazo. Esse comportamento permite que as deformações por fluência do material atinjam valores maiores que aquelas obtidas para ruptura do geossintético em ensaios de curta duração. Nos poliésteres e nas poliamidas, o escorregamento relativo entre cadeias é pouco significativo, levando à ruptura das mesmas em deformações menores. Dessa forma, é raro observar deformações por fluência muito maiores que as deformações na ruptura por ensaios de curta duração (DEN HOEDT, 1986). Adicionalmente, destaca-se que alguns tipos de polietileno são altamente resistentes à fluência, uma vez que possuem ramificações que podem se ligar a outras moléculas provocando um grande intrincamento mecânico da estrutura. Quando ligados dessa maneira, esses materiais apresentam comportamento em relação à fluência semelhante ao poliéster.

A Figura 2.10 ilustra a interferência do tipo de polímero na fluência de um geossintético, submetido a carregamentos iguais a 20 e 60% da resistência dos materiais (Figura 2.10a e Figura 2.10b, respectivamente), a partir dos resultados obtidos por Den Hoedt (1986). A diferença qualitativa devido ao nível de carregamento é desprezível.

Figura 2.10 – Curvas de fluência de fibras de diferentes polímeros submetidas a 20% da resistência à tração (a) e a 60% da resistência à tração (b), indicando a influência do tipo de polímero na fluência do geossintético (adaptado de DEN HOEDT, 1986).

Verifica-se que o polietileno (PE) apresenta os valores de deformação por fluência mais elevados, seguido pelo polipropileno (PP), poliamida (PA) e poliéster (PET). Esse resultado concorda também com a proposição de Cazzuffi et al. (1997). São apresentadas faixas de variação entre os ensaios realizados com polipropileno. O poliéster e a poliamida sofrem pequenas deformações por fluência e, mesmo para carregamentos mais elevados (60% da resistência), as suas representações possuem um caráter linear na escala semi-logarítmica do tempo.

2.4.3. Influência conjunta do tipo de geossintético e de polímero

Como discutido nos itens anteriores, o tipo de geossintético e de polímero apresentam suas próprias interferências no comportamento de fluência do material. É difícil quantificar exatamente qual a influência de cada parcela devido à grande diversidade de situações. Den Hoedt (1986) destaca, por exemplo, que a influência do tipo de polímero num geotêxtil não-tecido agulhado é pouco significativa, uma vez que a própria estrutura macroscópica do geossintético é responsável por grande parte das deformações por fluência. Por outro lado, esse autor também relata que as geogrelhas e geotêxteis tecidos têm deformações por fluência que dependem mais do tipo de polímero, visto que as deformações devido à estrutura macroscópica do material são pouco significativas.

Shinoda e Bathurst (2004b) ilustram o efeito conjunto do tipo de polímero e da estrutura do geossintético a partir de ensaios de fluência realizados em geogrelhas (Figura 2.11). A magnitude das deformações por fluência nessas geogrelhas não acompanhou a

mesma ordem citada no item 2.4.2, segundo o tipo de polímero (polietileno, polipropileno, poliamida e poliéster). As geogrelhas de polipropileno apresentaram deformações por fluência maiores que aquelas de polietileno de alta densidade (PEAD). Essa inversão pode ser justificada pelo processo de fabricação desses materiais. Embora ambas as geogrelhas sejam extrudadas, aquela manufaturada com fibras de polietileno de alta densidade é uniaxial, enquanto a outra (polipropileno) é biaxial. Assim, a conformação de ensaio de cada uma delas é diferente (Figura 2.11b e Figura 2.11c, respectivamente), o que conduziu à obtenção de diferentes valores de deformação por fluência.

Figura 2.11 – a) Curvas de fluência de diferentes geogrelhas submetidas a carregamentos iguais a 60% da resistência à tração, indicando a influência do tipo de polímero na fluência do geossintético; b) Arranjo geral para ensaio de fluência de uma geogrelha biaxial de polipropileno; c) Arranjo geral para ensaio de fluência de uma geogrelha uniaxial de polietileno de alta densidade (adaptado de SHINODA; BATHURST, 2004b).

2.4.4. Nível de carregamento

As deformações por fluência dos geossintéticos são fortemente dependentes do nível de carregamento ao qual o material é submetido. Koerner (2005) cita que esse pode ser o fator mais significativo nos estudos de fluência dos geossintéticos. O nível de carregamento é comumente expresso como uma porcentagem da resistência à tração obtida em ensaio de curta duração (e.g. ASTM D 4595 para geotêxteis e ASTM D 6637 para geogrelhas). A Figura 2.12 ilustra essa dependência através dos resultados obtidos por Simonini e Gottardi (2003) conduzidos com uma geogrelha de polipropileno.

Figura 2.12 – Influência do nível de carregamento no comportamento em relação à fluência de geossintéticos (adaptado de SIMONINI; GOTTARDI, 2003).

2.4.5. Velocidade de aplicação do carregamento

As deformações por fluência dos geossintéticos são menores quando a velocidade de aplicação do carregamento é menor. Uma vez que a deformação inicial corresponde àquela que ocorre até o final da aplicação do carregamento, quando esse procedimento é realizado lentamente, permite-se que as deformações devido ao comportamento viscoso dos geossintéticos ocorram simultaneamente às deformações de caráter elástico (SHINODA; BATHURST, 2004b). Dessa forma, as deformações iniciais serão maiores. Considerando-se que as deformações por fluência são iguais à diferença entre as deformações totais e as deformações iniciais (Equação 2), o aumento nas deformações iniciais devido à redução da velocidade de aplicação do carregamento levará a ocorrência de deformações por fluência

menores. Rimoldi e Montanelli (1993) ilustram esse comportamento a partir de ensaios de fluência em geogrelhas submetidos a uma solicitação igual a 40% da resistência à tração. Esses ensaios foram conduzidos com diferentes velocidades de aplicação do carregamento (um minuto, três minutos e uma hora) e seus resultados são apresentados na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Efeito da velocidade de aplicação do carregamento na fluência de uma geogrelha de PEAD, submetida a 40% da resistência à tração (adaptado de RIMOLDI; MONTANELLI, 1993).

A ocorrência de valores mais elevados de deformação inicial em carregamentos mais lentos pode ser explicada pela análise do comportamento tensão-deformação de ensaios de tração realizados com diferentes taxas de carregamento. Andrawes, McGown e Kabir (1984) e Shinoda e Bathurst (2004) investigaram a influência da velocidade de aplicação do carregamento em ensaios de tração de curta duração em diversos geossintéticos. Andrawes, McGown e Kabir (1984) indicam que a deformação total de geotêxteis submetidos a ensaios de tração de curta duração será igual ao somatório das deformações dos filamentos e daquelas devido ao rearranjo da macroestrutura do material. Adicionalmente, esses autores destacam que a variação da taxa de carregamento influi apenas na deformação devido ao alongamento dos filamentos do geossintético. Assim, as deformações dos geossintéticos que apresentam pouca modificação na macroestrutura (e.g. geotêxteis tecidos) são significativamente dependentes da velocidade de carregamento (Figura 2.14).

Figura 2.14 – Influência da velocidade de carregamento no ensaio de tração para geotêxtil tecido de polipropileno, no sentido transversal (adaptado de ANDRAWES; MCGOWN; KABIR, 1984).

Como mencionado anteriormente, pode-se entender que, em um ensaio de tração com uma baixa velocidade de carregamento, o geossintético é submetido a uma solicitação em tempo suficiente para que a fluência se processe. Portanto, um geossintético que apresente grandes diferenças nas curvas tensão-deformação devido à variação na taxa de aplicação do carregamento será mais susceptível a apresentar deformações por fluência mais expressivas. Contudo, esse comportamento não é presente em todos os geossintéticos. Os resultados de Shinoda e Bathurst (2004b) ilustram dois geossintéticos com comportamento tensão-deformação diferentes em relação à velocidade de aplicação do carregamento. A Figura 2.15a mostra os resultados de ensaios de tração com uma geogrelha de PEAD, onde foi percebida uma grande variação nas curvas tensão-deformação devido à variação na velocidade de aplicação do carregamento. As taxas de carregamento empregadas variaram entre 0,1 e 98%/minuto. A Figura 2.15b, por sua vez, ilustra uma faixa na qual todas as curvas tensão-deformação de uma geogrelha de PET se encontraram, com corpos de prova submetidos a taxas de deformação entre 0,1 e 103,4%/minuto.

Figura 2.15 – Influência da velocidade de aplicação do carregamento no ensaio de tração para uma geogrelha de PEAD (a) e de PET (b) (adaptado de SHINODA; BATHURST, 2004a).

Ao se comparar as figuras Figura 2.14 e Figura 2.15, verifica-se que a geogrelha de poliéster (Figura 2.15b) não apresentou diferenças significativas nas curvas solicitação de tração *versus* deformação, uma vez que se trata de um polímero que apresenta um pequeno nível de deformações por fluência, em relação às deformações iniciais devido à aplicação do carregamento. Por outro lado, as geogrelhas de polietileno (Figura 2.15a) e os geotêxteis tecidos de polipropileno (Figura 2.14) apresentaram grandes variações no comportamento tensão-deformação devido mudança na velocidade de aplicação do carregamento, concordando com o alto grau de deformações por fluência que esses polímeros apresentam.

A influência da velocidade de carregamento pode ser percebida também em ensaios não convencionais. Alawaji (2005) avaliou o comportamento de uma areia reforçada com geogrelhas submetida a ensaios de placa em escala reduzida. Esse autor verificou que os deslocamentos verticais da placa apresentam-se, do mesmo modo, em função da taxa de carregamento (Figura 2.16).

Figura 2.16 – Efeito da velocidade de aplicação da solicitação em ensaio de placa realizado sobre uma estrutura de solo reforçado com geogrelhas e areia com densidade relativa igual a 70%, em escala reduzida (adaptado de ALAWAJI, 2005).

2.4.6. Temperatura

O aumento da temperatura acelera o processo de deformações dependentes do tempo dos polímeros (FARRAG; SHIRAZI, 1997). Assim, essa variável deve ser controlada durante os ensaios realizados no estudo da fluência dos geossintéticos. A Figura 2.17 exemplifica a relação entre a temperatura e a fluência dos geossintéticos, a partir dos resultados obtidos por Scaffaro, Dintcheva e La Mantia (2008) em ensaios de fluência com uma membrana de poliamida.

Figura 2.17 – Influência da temperatura nas deformações por fluência de uma membrana de poliamida (adaptado de SCAFFARO; DINTCHEVA; LA MANTIA, 2008).

A relação entre a fluência e a temperatura não deve ser generalizada para todos os tipos de polímeros usados em geossintéticos (FARRAG; SHIRAZI, 1997). O efeito da temperatura depende da cristalinidade do polímero, que está intimamente relacionada às suas propriedades térmicas. Dois valores característicos de temperatura de cada geossintético regem os movimentos moleculares e, portanto, o comportamento visco-elástico dos polímeros: a temperatura de fusão cristalina (T_m) e a temperatura de transição vítrea (T_g) (CONSTANZI, 2003). A temperatura de fusão cristalina é definida como aquela a partir da qual o polímero encontra-se em seu estado fundido e não apresenta mais nenhuma região cristalina. Portanto, esse valor é uma característica das regiões cristalinas do polímero e quanto maior a sua cristalinidade, maior será o valor de T_m . A temperatura de transição vítrea, por sua vez, é definida como aquela na qual o polímero passa do estado vítreo (sólido) para o estado de mobilidade (FERRY, 1980). Este valor é característico das regiões não cristalinas do polímero.

As deformações por fluência dos polímeros são mais significativas quando o material é submetido ao carregamento constante em uma temperatura acima do seu valor de T_g . Os resultados obtidos por Farrag e Shirazi (1997) ilustram essa situação. Esses autores realizaram ensaios de fluência em geogrelhas de poliéster e de polietileno de alta densidade submetidas a carregamentos similares. A Figura 2.18 apresenta esses resultados, com as deformações por fluência sendo consideradas em dois momentos distintos após o término da aplicação do carregamento (1 hora e 500 horas).

Figura 2.18 – Efeito da temperatura nas deformações por fluência de geogrelhas de poliéster e de polietileno de alta densidade (adaptado de FARRAG; SHIRAZI, 1997).

Percebe-se que a geogrelha de PET apresentou deformações por fluência maiores que a de PEAD em temperatura ambiente (24°C). Contudo, a dependência em relação à temperatura é maior na geogrelha de PEAD, pois as deformações por fluência dessa geogrelha variam mais rapidamente com o aumento da temperatura. Esse fato pode ser analisado a partir do valor de T_g destes dois polímeros em relação à temperatura de realização dos ensaios. O valor de T_g do poliéster é da ordem de 75°C e do polietileno de alta densidade, cerca de -80°C. Assim, todos os ensaios com geogrelhas de PEAD foram executados em temperaturas maiores que o valor de T_g . O oposto foi realizado com a geogrelha de PET, com todos os ensaios sendo conduzidos em temperaturas menores que seu valor de T_g . Isso conduz a deformações por fluência com crescimento mais expressivo em relação à temperatura de ensaio nos ensaios realizados com a geogrelha de PEAD.

2.4.7. Confinamento em solo

Estruturas de solo reforçado com geossintéticos comumente apresentam deformações por fluência inferiores às previstas em projeto, estabelecidas com base em ensaios não confinados (COSTA, 2004; BENJAMIM, 2006). Isso sugere que a metodologia de projeto aplicada nos dias atuais é conservadora, indicando que o comportamento tensão-deformação dos geossintéticos submetidos ao confinamento por solo é bastante diferente daquele obtido para os materiais sem confinamento. Essa diferença pode ser percebida nos ensaios de tração e de fluência (COSTA, 1999). Koerner, Lord Jr. e Halse (1988) destacam ainda que os ensaios nos quais o confinamento pelo solo não é reproduzido podem, portanto, ser não realistas. A Figura 2.19 ilustra a influência do confinamento em um geotêxtil não-tecido de polipropileno submetido a 40% da sua resistência à tração (COSTA, 1999).

Entre os motivos associados a essa discrepância, o confinamento em solo pode reduzir a liberdade estrutural do geossintético, i.e. restringir o movimento relativo entre as fibras que o formam, e aumentar o atrito entre as mesmas. Assim, o alinhamento das fibras na direção do carregamento é evitado ou diminuído. Pode-se, portanto, concluir que esse efeito é mais significativo em geossintéticos com distribuição aleatória das fibras, e.g. geotêxteis não-tecidos, sendo pouco significativo em geotêxteis tecidos e praticamente ausente nas geogrelhas (JEWELL; GREENWOOD, 1988; KOERNER, 2005). Min et al. (1995) concluem, ainda, que a taxa de deformação por fluência das geogrelhas é uma propriedade intrínseca do material e, portanto, independente da tensão confinante. Ainda existem

discrepâncias relacionadas à dependência que as deformações por fluência dos geossintéticos apresentam em relação ao confinamento em solo. Por essa razão, Federal Highway Administration (1998) sugere que o comportamento em fluência sob tração dos geossintéticos seja caracterizado no tocante a esse aspecto.

Figura 2.19 – Efeito do confinamento em solo nas deformações por fluência em um geotêxtil não-tecido agulhado de polipropileno (adaptado de COSTA, 1999).

O confinamento é também comumente referido como uma forma de impregnação do geossintético com solo. Mendes e Palmeira (2007) indicam que grãos sub-angulares de uma areia fina promoveram um incremento na rigidez de geotêxteis não tecidos maior do que os grãos esféricos e lisos de microesferas de vidro. Por outro lado, Costa (1999) avaliou esse aspecto relacionado à impregnação dos geotêxteis não tecidos e percebeu que ele não se mostrou presente devido ao processo de compactação do solo confinante e pouco significativo quando foi utilizada uma pasta de solo para impregnação manual do geossintético. Assim, pode-se mencionar que a maior contribuição para a redução das deformações por fluência dos geossintéticos devido ao confinamento em solo é relacionada à restrição da movimentação entre as fibras.

Ainda que a estrutura macroscópica do geossintético seja preponderante para definir se o confinamento em solo será significativo na fluência do material, é fundamental conhecer o tipo de polímero que o compõe para verificar essa influência. McGown, Andrawes e Kabir (1982) avaliaram a influência do confinamento na fluência de geotêxteis não-tecidos de polietileno e polipropileno e de poliéster (Figura 2.20).

Figura 2.20 – Efeito do confinamento sobre as deformações por fluência segundo o tipo de polímero em geotêxteis não-tecidos: a) termoligado, 33% PEAD e 67% PP; b) agulhado, 100% PET (adaptado de MCGOWN; ANDRAWES; KABIR, 1982).

Verifica-se que o confinamento por solo diminuiu o nível de deformações iniciais em ambos os geotêxteis e reduz expressivamente as deformações por fluência nas poliolefinas (PE e PP), como ilustrado na Figura 2.20a. Por outro lado, o confinamento em solo não possui uma influência significativa na fluência do PET, resultando numa redução significativa apenas das deformações iniciais (Figura 2.20b).

2.4.8. Sinergia com alguns tipos de degradação

Diversos estudos foram concebidos com o objetivo de associar o comportamento visco-elástico dos materiais poliméricos com diferentes fatores, e.g. temperatura, radiação ultravioleta e umidade, ou a combinação entre eles (SCAFFARO; DINTCHEVA; LA MANTIA, 2008; TRENTINI; VIDAL; MARTINS, 2006; KONGKITKUL; TATSOUKA; HIRAKAWA, 2007; SEEGER; MÜLLER; MOHR, 2002; MERRY; BRAY; YOSHITOMI, 2005; PAULA; PINHO-LOPES; LOPES, 2008).

Scaffaro, Dintcheva e La Mantia (2008) desenvolveram um novo equipamento capaz de avaliar simultaneamente a influência da temperatura, exposição à luz ultravioleta e umidade na fluência de geossintéticos e de simular as condições reais de campo. Esses autores, contudo, não apresentam nenhum ensaio com a combinação desses efeitos. Por outro lado, Trentini, Vidal e Martins (2006) e Kongkitkul, Tatsouka e Hirakawa (2007) avaliaram a

combinação entre a fluência de geossintéticos e diferentes processos de degradação do material. Trentini, Vidal e Martins (2006) investigaram a sinergia entre a perda de resistência devido à degradação química em meio alcalino (solução de Ca(OH)_2 com pH igual a 12) e à degradação por fluência. A partir de ensaios em fibras de poliéster, os autores verificaram que o efeito combinado desses dois tipos de degradação é mais significativo que a soma dos efeitos de cada um separadamente, representada pelo produto dos fatores de redução devido a cada parâmetro (Figura 2.21).

Figura 2.21 – Sinergia entre a degradação química e fluência de fibras de poliéster (adaptado de TRENTINI; VIDAL; MARTINS, 2006).

Kongkitkul, Tatsouka e Hirakawa (2007) avaliaram, a partir de simulações numéricas, a sinergia entre a perda de resistência devido ao processo de envelhecimento do geossintético e a fluência. As deformações por fluência foram simuladas em três condições: sem ocorrência do envelhecimento prévio do material, deformações concomitantes ao processo de envelhecimento e deformações ocorridas apenas após envelhecimento de 50 anos. A Figura 2.22 ilustra o comportamento do geossintético obtido numericamente nessas três condições. Percebe-se que a curva referente à ação simultânea da fluência e do envelhecimento parte do ponto onde não houve o processo de degradação e tende a encontrar a curva de fluência após envelhecimento em um valor de tempo elevado. Esses autores publicaram análises adicionais que contribuem para esse entendimento (HIRAKAWA et al., 2003; KONGKITKUL et al., 2004; TATSUOKA; KONGKITKUL; HIRAKAWA, 2006; KONGKITKUL; TATSUOKA, 2007).

Figura 2.22 – Relação entre fluência e envelhecimento de geossintéticos através de simulações numéricas (adaptado de KONGKITKUL; TATSOUKA; HIRAKAWA, 2007).

2.5. Ensaios para determinação do comportamento em fluência sob tração dos geossintéticos

A verificação do comportamento em fluência sob tração dos geossintéticos é comumente realizada por meio de ensaios de laboratório de baixa complexidade, nos quais um corpo de prova de geossintético é submetido a uma solicitação de tração constante enquanto suas deformações são determinadas. Esses ensaios são normalizados por diversas entidades (e.g. ABNT NBR 15226, ASTM D 5262, ISO 13431 e BS 6906-5) e devem ser executados sob condições ambiente controladas (temperatura e umidade relativa do ar). Outras recomendações são encontradas nas normas técnicas em relação aos ensaios de fluência em geossintéticos. Entre elas, destaca-se a importância de garantir um suporte rígido e livre de vibrações para montagem do ensaio, assegurar que o carregamento seja aplicado suavemente e a uma taxa idêntica em todos os ensaios e evitar quaisquer interferências externas que possam comprometer os resultados (e.g. variações de temperatura, umidade do ar e carregamento).

Os ensaios normalizados de fluência em geossintéticos são referidos nesta tese como ensaios convencionais de fluência e apresentam, basicamente, dois objetivos. O primeiro deles é verificar o comportamento em deformação por fluência do material. Assim,

valores menores de carregamento são empregados, entre 10 e 60% da resistência à tração do material obtida em ensaios de tração de curta duração. Recomenda-se que pelo menos quatro níveis de carregamento sejam aplicados em diferentes corpos de prova e que esses ensaios durem entre 1.000 e 10.000 horas. A variabilidade do geossintético pode ser mensurada a partir da realização do ensaio em vários corpos de prova com o mesmo nível de carregamento. O resultado típico desses ensaios é apresentado na Figura 2.4.

O segundo objetivo dos ensaios de fluência é alcançado quando as solicitações de tração empregadas atingem valores mais elevados (60 a 90% da resistência à tração). Esses ensaios de fluência são realizados com o propósito de avaliar o comportamento na ruptura por fluência e são comumente referidos como ensaios de ruptura por fluência. Neles, os corpos de prova são submetidos a níveis de carregamento diferentes e determina-se o tempo para que a ruptura ocorra. Salienta-se que a variabilidade do material deve ser considerada neste procedimento e, portanto, sugere-se a realização de, no mínimo, três ensaios com corpos de prova diferentes para cada nível de carregamento. A Figura 2.23 exemplifica um resultado típico de ensaios de ruptura por fluência a partir de ensaios conduzidos por Zornberg, Byler e Knudsen (2004).

Figura 2.23 – Resultado típico de ensaios de ruptura por fluência (adaptado de ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).

Os equipamentos empregados nos ensaios de fluência em geossintéticos apresentam diferentes configurações, mas se baseiam no princípio de aplicação de um carregamento constante e medida do alongamento dos corpos de prova. Portanto, esses equipamentos apresentam basicamente três sistemas distintos: ancoragem, acompanhamento das deformações e aplicação do carregamento (COSTA, 1999). A Figura 2.24 ilustra o equipamento proposto na norma ASTM D 5262 para realização de ensaios de fluência em geotêxteis.

Figura 2.24 – Equipamento típico para ensaio de fluência em geossintéticos (adaptado da norma ASTM D 5262).

A fixação do corpo de prova de geossintético na configuração apresentada na Figura 2.24 deve ser feita por meio de garras que impeçam qualquer deslizamento e que não danifiquem o material. Assim, as garras do tipo mordente podem ser substituídas por exemplos de outra categoria (e.g. garras do tipo rolete) quando carregamentos mais elevados são aplicados ou quando não há aderência suficiente com os corpos de prova. O sistema de acompanhamento do alongamento do corpo de prova ilustrado na Figura 2.24 é, por sua vez, composto por medidores de deslocamento e barras de referência fixadas no corpo de prova. A partir das leituras de deslocamento dessas barras, calculam-se as deformações dos corpos de prova durante os ensaios. A utilização de transdutores de deslocamento permite que os ensaios sejam conduzidos com aquisição automática dos dados. Outros sistemas também possibilitam que os ensaios sejam realizados com aquisição automática dos registros de alongamento do corpo de prova. A utilização de contadores de passo ligados a sistemas que acompanham o deslocamento de pontos específicos do corpos de prova (e.g. feixe de laser) e videoextensômetros são exemplos desses sistemas.

A Figura 2.24 propõe a utilização de pesos livres para a aplicação do carregamento constante e células de carga para a verificação do valor empregado. O uso de pesos livres acoplados às garras inferiores dos equipamentos de ensaio de fluência em

geossintéticos apresenta-se como o método mais empregado para a aplicação do carregamento aos corpos de prova. Esse sistema destaca-se pela seu baixo custo, precisão e estabilidade. Por outro lado, está limitado à quantidade adequada de pesos livres que pode ser posicionada no equipamento e, portanto, se torna pouco prático quando carregamentos mais elevados são necessários (FARRAG; SHIRAZI, 1997).

Um sistema de alavancas pode ser empregado para aumentar a solicitação de tração que pode ser atingida por um determinado equipamento de fluência em geossintéticos (GREENWOOD, 1990). Contudo, esse sistema está sujeito ao desnivelamento da alavanca devido à ocorrência das deformações por fluência no corpo de prova, que são, ainda, multiplicadas pela mesma relação entre os braços da alavanca. Isso leva à variação do carregamento durante o ensaio e precisa, portanto, ser corrigido. A correção deste empecilho pode se dar através da utilização de um sistema mecânico para corrigir o nível da alavanca durante os ensaios de fluência e manter o carregamento constante.

Outra alternativa para a aplicação da solicitação de tração nos ensaios de fluência em geossintéticos é o emprego de pistões pneumáticos ou hidráulicos (FARRAG; SHIRAZI, 1997). Embora permitam a aplicação de cargas mais elevadas, esses sistemas apresentam-se mais caros e necessitam de manutenções frequentes para garantir a aplicação de um carregamento constante com uma precisão aceitável durante o ensaio. Destaca-se ainda a necessidade de manutenção do sistema de pressão (pneumática ou hidráulica) do laboratório onde o ensaio é executado.

A utilização de máquinas universais de ensaio cervocontroladas aparece como uma opção mais avançada para a execução de ensaios de fluência em geossintéticos. Esses equipamentos permitem a aplicação de esforços de tração e compressão e podem ser complementadas por diferentes elementos para instrumentação dos ensaios, e.g. medidores de deslocamento, células de carga e videoextensômetros. Adicionalmente, possuem interface computacional acessível e podem, a partir de programação prévia, ser empregados em ensaios de fluência. Apesar de aparecerem como equipamento de grande aplicabilidade nesses ensaios, seu alto custo limita o uso extensivo.

Apesar de ser amplamente utilizada, a configuração convencional dos ensaios de fluência apresenta duas características que limitam o seu uso. Em primeiro lugar, trata-se de ensaios bastante demorados, o que pode onerar o processo de determinação do comportamento em fluência dos geossintéticos. O segundo aspecto refere-se à interação solo-geossintético. Embora esse fenômeno esteja presente na maioria das obras onde os

geossintéticos são empregados, a definição dos parâmetros de fluência desses materiais baseia-se em ensaios nos quais corpos de prova em isolamento são utilizados. Conforme exposto no item 2.4.7, o confinamento em solo pode ter um efeito significativo na fluência dos geossintéticos e, portanto, precisa ser considerado. Diante disso, metodologias diferentes foram propostas para acelerar a determinação do comportamento em fluência dos geossintéticos e investigar o efeito do confinamento em solo sobre esse fenômeno.

2.5.1. Ensaios acelerados de fluência em geossintéticos

A dependência que o comportamento em fluência dos geossintéticos apresenta em relação à temperatura foi exposta no item 2.4.6. Percebe-se que as deformações por fluência nos geossintéticos é proporcional à elevação da temperatura de ensaio. Assim, esse princípio é empregado para acelerar a determinação do comportamento em fluência desses materiais. Quando as deformações por fluência são apresentadas em função do tempo de ensaio em diferentes temperaturas, as curvas logarítmicas obtidas podem ser transladadas de forma a se sobreporem e permitirem a obtenção de uma curva única (FARRAG, 1998). Dessa forma, a realização de diferentes ensaios de fluência com corpos de prova submetidos ao mesmo nível de carregamento, mas em temperaturas diferentes, permite a construção de uma curva que representa as deformações do geossintético até um valor de tempo maior. Essa curva é denominada curva mestra de fluência e a Figura 2.25 ilustra o processo para sua determinação.

Figura 2.25 – Translação horizontal dos resultados de ensaios de fluência conduzidos em temperaturas diferentes com o mesmo nível de carregamento.

Apesar de tratar-se de um caso genérico, a Figura 2.25 exemplifica claramente o efeito da temperatura nas deformações dos corpos de prova. O processo de translação para obtenção da curva mestra de fluência altera o formato das curvas obtidas em temperatura elevada, estendendo-as. Isso permite que valores mais elevados de tempo sejam atingidos, uma vez que a curva mestra se estenderá por mais ciclos logarítmicos que a soma dos ciclos de cada ensaio. Na situação ilustrada na Figura 2.25, cada ensaio de fluência foi conduzido por 2,78 ciclos logarítmicos e a curva mestra atinge 9,49 ciclos.

O processo de translação das curvas de fluência obtidas em temperaturas elevadas é embasado conceitualmente no princípio de superposição tempo-temperatura. Esse princípio baseia-se na relação entre a taxa de reação e a temperatura encontrada em diversos processos físicos e químicos, inclusive no comportamento em fluência dos geossintéticos. Essa relação é descrita pela Equação de Arrhenius, cuja expressão é comumente apresentada conforme a Equação 4 (Koerner et al, 1992).

$$k = k_0 e^{-(E/RT)} \quad \text{Equação 4}$$

onde k é a taxa de reação cinética, k_0 é uma constante, E é a energia de ativação, em J/mol, R é a constante universal dos gases (8,314 J/K.mol) e T é a temperatura absoluta, em K.

No caso da fluência dos geossintéticos, a taxa de reação corresponde à taxa de deformação por fluência. Assim, empregando-se a Equação de Arrhenius e a taxa de deformação por fluência ($\dot{\epsilon}_1$) em uma determinada temperatura (T_1), pode-se obter a taxa de deformação de deformação por fluência ($\dot{\epsilon}_2$) em uma temperatura T_2 . A demonstração deste cálculo é apresentada a seguir, resultando na Equação 5.

$$\begin{aligned} \ln k &= \ln[k_0 e^{-(E/RT)}] \\ \ln k &= \ln k_0 - (E/RT) \\ \ln \dot{\epsilon}_1 - \ln \dot{\epsilon}_2 &= [\ln k_0 - (E/RT_1)] - [\ln k_0 - (E/RT_2)] \\ \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2} \right) &= \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \end{aligned} \quad \text{Equação 5}$$

A Equação 5 pode, portanto, ser utilizada para prever a taxa de deformação por fluência em uma temperatura de referência, e.g. temperatura ambiente, a partir dos valores determinados em temperaturas maiores. Vale salientar que a Equação de Arrhenius assume que o comportamento viscoelástico (i.e. fluência) dos geossintéticos e a energia de ativação são constantes nos ensaios conduzidos em temperaturas elevadas (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).

A Equação de Arrhenius retrata o comportamento de gases com fidelidade. No caso dos geossintéticos, por outro lado, a sua aplicação apresenta limitações devido à dificuldade na determinação da energia de ativação da reação, uma vez que seu valor não é constante ao longo dos ensaios (BARAS, 2001). Além disso, a Equação de Arrhenius não considera nenhuma variável tempo explicitamente (ZORNBERG; BYRDE; KNUDSEN, 2004). Assim, outro procedimento pode ser empregado para justificar a translação horizontal dos dados obtidos em temperaturas elevadas. Esse procedimento foi elaborado por Williams, Landel e Ferry (1955) e introduz o conceito de fator de translação, a_T (do inglês, *shift fator*). O fator de translação pode ser definido como a razão entre o tempo necessário para que um processo viscoelástico ocorra em uma temperatura qualquer e o tempo necessário para que o mesmo processo ocorra em uma temperatura de referência (THORNTON; ALLEN; THOMAS, 1997). Essa relação é explicitada na Equação 6. Quando se considera a deformação dos corpos de prova nos ensaios de fluência como processo em questão, essa equação assume a forma apresentada na Equação 7.

$$a_T = \frac{t_T}{t_R} \quad \text{Equação 6}$$

onde a_T é o fator de translação; t_T é o tempo necessário para que o referido processo ocorra na temperatura T (elevada) e t_R é o tempo necessário para que o referido processo ocorra na temperatura de referência (e.g. temperatura ambiente).

$$\varepsilon_{T_0}(T_0, t) = \varepsilon_T\left(T, \frac{t}{a_T}\right) \quad \text{Equação 7}$$

onde ε_{T_0} é a deformação na temperatura de referência, T_0 é a temperatura de referência, t é o tempo, ε_T é a deformação em temperatura elevada e a_T é o fator de translação.

Em temperaturas maiores que a temperatura de referência, a_T assume valores menores que a unidade. Assim, o fator de translação pode, em alguns casos, ser referido como fator de atenuação e o seu inverso (A_T) como fator de aceleração (THORNTON; ALLEN; THOMAS, 1997). O fator de translação assume diferentes valores, determinados em função da diferença entre a temperatura de ensaio e a de referência. A Figura 2.26 ilustra essa relação entre o fator de translação e a temperatura a partir de resultados de ensaios de fluência conduzidos com uma geogrelha de PEAD (FARRAG, 1998). Salienta-se que a temperatura é apresentada em graus Fahrenheit na Figura 2.26.

Figura 2.26 – Exemplo da variação do fator de translação com a temperatura de ensaio para uma geogrelha de PEAD (adaptado de FARRAG, 1998).

O fator de translação é descrito pela Equação WLF, obtida empiricamente, e assume a expressão apresentada na Equação 8.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad \text{Equação 8}$$

onde C_1 e C_2 são constantes determinadas empiricamente.

As constantes empíricas C_1 e C_2 dependem do tipo de polímero com o qual o geossintético foi fabricado, da temperatura de transição vítrea desse polímero e da temperatura de referência. A proposta de Williams, Landel e Ferry (1955) (Equação WLF) não é aplicável para valores de temperatura muito inferiores à temperatura de transição vítrea (T_g) do polímero uma vez que prevê um crescimento monotônico do logaritmo de a_T com o decréscimo da temperatura. Além disso, o logaritmo de a_T seria igual a infinito quando $T = T_0 - C_2$. Contudo, entre T_g e $(T_g + 100)$, essa fórmula pode ser empregada para determinar o efeito da temperatura em processos mecânicos e dielétricos (WILLIAN; LANDEL; FERRY, 1955).

O procedimento para aceleração da determinação do comportamento em fluência dos geossintéticos apresentado até aqui requer a utilização de vários corpos de prova, cada qual submetido a um mesmo nível de carregamento, mas em valores de temperatura diferentes. A partir desses ensaios e da translação horizontal dos resultados obtidos em temperatura elevada, pode-se formar a curva mestra do referido geossintético, num determinado nível de carregamento. Farrag e Shirazi (1997), Farrag (1998) e Jeon, Kim e Yoo (2002) apresentam estudos onde essa metodologia foi empregada para interpretar os

resultados de ensaios de fluência em geossintéticos realizados em temperaturas elevadas.

Essa metodologia apresenta-se como uma técnica de grande aplicabilidade nos ensaios acelerados de fluência. Contudo, o uso de diferentes corpos de prova para obtenção das curvas de fluência em temperaturas elevadas pode levar à produção de resultados incoerentes devido à variabilidade inerente ao processo de fabricação dos geossintéticos. Com o propósito de solucionar essa limitação, Thornton et al. (1998) elaboraram um novo procedimento no qual apenas um corpo de prova é submetido a estágios crescentes de temperatura enquanto a solicitação de tração é mantida constante. Esse método foi denominado *Stepped Isothermal Method*, comumente referido pelas iniciais SIM, e conta com norma internacional (ASTM D 6992). Diversos autores publicaram estudos com ensaios acelerados de fluência nos quais essa metodologia foi aplicada (BARAS, 2001; THORNTON; BAKER, 2002; BARAS; BUENO; COSTA, 2002; CONSTANZI, 2003; CONSTANZI et al., 2003; ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004; HSUAN; YEO, 2005; YEO; HSUAN, 2008).

Thornton et al. (1998) é comumente considerada a primeira referência na literatura que estabelece o procedimento para a execução dos ensaios acelerados SIM. Contudo, Thornton, Allen e Thomas (1997) já ilustram uma metodologia semelhante, porém ainda em fase de elaboração. Nesse estudo, os autores aceleraram a fluência de uma geogrelha de poliéster a partir da elevação da temperatura do ensaio em apenas um estágio. Relatam, também, o método para interpretar esse ensaio e conseguiram prever o resultado de cerca de três anos, frente a aproximadamente oito meses de execução de ensaios.

A metodologia SIM se baseia no mesmo princípio de superposição tempo-temperatura para a caracterização das propriedades viscoelásticas de materiais poliméricos (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004). Em adição a isso, o princípio da superposição de Boltzmann indica que as deformações ocorridas em um corpo de prova devido à aplicação de diversos carregamentos podem ser somadas para determinar a deformação total correspondente à aplicação de um carregamento único e igual ao somatório dos valores parciais. Assim, uma vez que cada incremento de temperatura pode ser considerado como um aumento discreto no carregamento, esse princípio pode ser aplicado ao método SIM. Salienta-se, contudo, que os incrementos de temperatura sejam realizados rapidamente, pois a energia de ativação da reação é assumida como constante ao longo dos ensaios. A norma ASTM D 6992 recomenda que os incrementos de temperatura sejam atingidos em até quatro minutos.

A geração da curva mestra de fluência a partir dos resultados de ensaios onde o método SIM foi empregado é demonstrada na Figura 2.27. O ensaio é inicialmente conduzido como um ensaio convencional de fluência em geossintéticos, em temperatura ambiente. Após um período pré-determinado, ilustrado como ponto P na Figura 2.27a, procede-se a elevação da temperatura rapidamente. Esse procedimento é repetido por quantas vezes forem planejadas. Cada estágio de temperatura é considerado como um ensaio de fluência independente, com a contagem do tempo sendo reiniciada após cada incremento de temperatura. O ponto P na Figura 2.27a corresponde ao último ponto do primeiro estágio de temperatura e, igualmente, a um ponto intermediário do segundo estágio, com tempo igual a t_1 . Assim, pode-se perceber que o tempo de início do segundo estágio é, na verdade, igual a t_0 . O valor de t_0 pode ser estimado em uma representação gráfica semilogarítmica como aquele necessário para que ambas as curvas de fluência possuam a mesma inclinação nas proximidades do ponto P (BUENO; CONSTANZI; ZORNBERG, 2005). Define-se, ainda, como tempo virtual a diferença entre t_1 e t_0 para cada transição entre estágios de temperatura.

O primeiro passo para a construção da curva mestra de fluência a partir de ensaios acelerados empregando o método SIM é a modificação da escala de tempo dos dados obtidos em cada temperatura utilizada no ensaio. Para isso, é necessário aplicar correções ao tempo de ensaio de tal sorte que a inclinação inicial da curva de fluência obtida em uma determinada temperatura elevada seja idêntica à inclinação final da curva de fluência em escala logarítmica obtida na temperatura anterior. Esse procedimento empírico é consistente com a Equação de Arrhenius e com a Equação WLF (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004). Uma vez que o processo físico em análise é a taxa de deformação por fluência dos corpos de prova, que pode ser representada pela inclinação das curvas de fluência, os dados obtidos em cada temperatura são modificados empiricamente para corresponderem àqueles encontrados na temperatura de referência. O resultado desse processo é ilustrado na Figura 2.27b.

Procede-se a translação dos segmentos ajustados empiricamente de maneira a se sobrepor e produzir a curva mestra de fluência do geossintético, num determinado nível de carregamento. O princípio da superposição de Boltzmann justifica a formação da curva mestra a partir da soma das deformações por fluência ocorridas em diferentes temperaturas (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).

Figura 2.27 – Geração da curva mestra de fluência pelo método SIM em um geotêxtil tecido de PP com carregamento igual a 30% da sua resistência à tração: a) Dados brutos em escala natural; b) Dados em escala logarítmica; c) Curva mestra de fluência (adaptado de ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).

Foram apresentados dois procedimentos para interpretar os ensaios acelerados de fluência em geossintéticos. O primeiro deles emprega diferentes corpos de prova que são submetidos à solicitação de tração constante em diferentes valores de temperatura. O segundo método (SIM), emprega um único corpo de prova que, após a aplicação do carregamento, é

submetido a estágios crescentes de temperatura. Assim, as principais diferenças entre os dois métodos no tocante a sua execução diz respeito à quantidade de corpos de prova e aos valores de temperatura empregados.

Embora os métodos de interpretação dos ensaios acelerados de fluência em geossintéticos apresentem diferenças entre si, eles utilizam resultados provenientes de ensaios conduzidos em equipamentos semelhantes. Esses equipamentos baseiam-se na configuração adotada nos ensaios convencionais de fluência (Figura 2.24), a qual é implementada uma câmara com os elementos necessários para elevar a temperatura e mantê-la num patamar desejado, considerando-se uma variação aceitável. Assim, uma certa similaridade é encontrada entre as alternativas utilizadas em pesquisas científicas para realização de ensaios acelerados de fluência em geossintéticos.

Câmaras de ensaios, manufaturadas com material isolante térmico, são comumente encontradas na literatura técnica como opção empregada. Essas câmaras devem proporcionar o isolamento térmico do corpo de prova durante os ensaios e possibilitar o incremento e manutenção da temperatura. Nelas, os corpos de prova são posicionados e presos às garras que possibilitam a aplicação do carregamento. Outros instrumentos podem, ainda, ser instalados no interior da câmara de ensaio, e.g. células de carga, medidores de deslocamento e transdutores de temperatura. Esses instrumentos precisam ser calibrados para considerar o efeito da temperatura no registro dos dados coletados. Salienta-se também que é preciso dimensionar um sistema de elevação da temperatura que seja capaz de levar o corpo de prova a um novo estágio em um curto espaço de tempo para a execução de ensaios empregando a metodologia SIM.

A principal diferença encontrada entre os equipamentos descritos na literatura técnica para realização de ensaios acelerados de fluência diz respeito aos elementos usados para o aquecimento do interior da câmara. Uma alternativa é utilizar um conjunto de resistências elétricas para elevar a temperatura no interior da câmara de ensaio e, juntamente com um conjunto de ventiladores, manter esse valor constante e uniforme (BARAS, 2001; CONSTANZI, 2003; ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004; HSIEH; LEE; TAIN, 2006). Outros sistemas que podem ser utilizados para esse fim são formados por sopradores de ar quente instalados à câmara de ensaios (JEON; KIM; YOO, 2002) ou ainda a utilização de fornos elétricos adaptados para receber os corpos de prova e demais elementos (e.g. garras, instrumentação) (FARRAG, 1997; FARRAG; SHIRAZI, 1997; SCAFFARO; DINTCHEVA; LA MANTIA, 2007; TONG; GONG; LIU, 2008).

2.5.2. Ensaio confinados de fluência em geossintéticos

O efeito do confinamento no comportamento em fluência dos geossintéticos foi demonstrado no item 2.4.7. Diversos estudos empregaram equipamentos especiais para avaliar esse comportamento, bem como verificar o desempenho dos geossintéticos em ensaios confinados de tração. Federal Highway Administration (1998) e Costa (1999) discorrem detalhadamente sobre diversos aparatos relatados na literatura técnica para a realização de ensaios confinados de fluência e tração. Apesar de possuírem um propósito comum, esses equipamentos diferem principalmente em relação à forma de transferência da solicitação de tração ao geossintético. Federal Highway Administration (1998) classifica os equipamentos para verificação do comportamento sob confinamento (tração e fluência) dos geossintéticos em duas categorias: aqueles nos quais o carregamento é aplicado diretamente aos corpos de prova e aqueles nos quais a tensão confinante é aplicada ao solo circundante e as tensões no corpo de prova são desenvolvidas a partir da interação solo-geossintético.

A configuração na qual o carregamento é aplicado diretamente ao corpo de prova é esquematizada na Figura 2.28. Uma vez que a solicitação de tração é aplicada com uma taxa de deslocamento (ou de deformação) constante, i.e. de maneira idêntica aos ensaios convencionais (não confinados), essa configuração apresenta-se mais adequada para isolar a influência do confinamento nos ensaios de fluência e tração (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998). Adicionalmente, destaca-se a facilidade de implementação dos elementos necessários aos equipamentos usados nos ensaios convencionais de fluência e tração.

Figura 2.28 – Configuração empregada em ensaios confinados de fluência em geossintéticos nos quais o carregamento é aplicado diretamente ao corpo de prova (adaptado de COSTA, 2004).

O aspecto negativo de maior destaque nessa configuração reside na variação da solicitação de tração ao longo do corpo de prova devido ao atrito desenvolvido com o solo. Percebe-se, na Figura 2.28, que a solicitação de tração que atinge, por exemplo, o centro do corpo de prova (F') é menor que o valor aplicado na garra posicionada fora da câmara de ensaio (F). Esse fato dificulta a interpretação dos resultados uma vez que as deformações por fluência obtidas com equipamentos que empregam essa configuração serão reduzidas pelo simples fato de haver uma diminuição no esforço de tração aplicado ao longo do corpo de prova. Assim, devido à mobilização das forças de atrito na interface solo-geossintético, os ensaios confinados de fluência com essa configuração podem, na verdade, refletir a ação tanto do confinamento como das forças de atrito e adesão nessa interface (WU, 1991).

O segundo tipo de equipamento empregado para verificar o comportamento dos geossintéticos sob confinamento consiste na aplicação da tensão confinante ao solo circundante e, por meio da interação solo-geossintético, as tensões são transmitidas ao corpo de prova. Em outras palavras, a aplicação de uma tensão vertical na superfície do solo leva a um incremento nas tensões horizontais no interior da câmara de ensaio. Assim, devido à interação solo-geossintético, ocorre um aumento nas tensões mensuradas no geossintético. Essa configuração foi elaborada para simular as condições tipicamente observadas em geossintéticos durante e/ou após a construção de estruturas de solo reforçado (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998) e é ilustrada na Figura 2.29.

Figura 2.29 – Configuração empregada em ensaios confinados de fluência em geossintéticos nos quais a tensão confinante é aplicada ao solo circundante e as tensões no corpo de prova são desenvolvidas a partir da interação solo-geossintético (adaptado de COSTA, 2004).

Apesar de reproduzir com maior fidelidade a maneira como os geossintéticos são solicitados em condições reais, o comportamento confinado obtido por meio de equipamentos com essa configuração reflete a influência de várias variáveis, entre elas o confinamento em solo (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998). Destaca-se também a influência da taxa de deformação. As investigações sobre o efeito do confinamento na fluência dos geossintéticos são comumente conduzidas por meio da comparação dos resultados com

aqueles provenientes de ensaios convencionais. Esses ensaios são realizados com taxas de aplicação do carregamento (ou taxas de deformação/deslocamento) constantes, que são superiores às obtidas em obras reais. A velocidade de aplicação do carregamento é fator preponderante no comportamento em fluência dos geossintéticos, conforme explicitado no item 2.4.5. Assim, ensaios confinados de fluência com equipamentos baseados nessa configuração podem resultar em taxas de aplicação do carregamento muito pequenas, dificultando a comparação com ensaios convencionais de fluência e a verificação do efeito do confinamento, isoladamente.

Pode ser percebido que os ensaios confinados de fluência são, de fato, mais complexos que os convencionais, não apenas em relação a sua montagem e execução mas também no tocante à interpretação dos resultados (COSTA, 2004). O efeito do confinamento no comportamento tensão-deformação dos geossintéticos foi estudada pioneiramente por McGown, Andrawes e Kabir (1982). Esses autores executaram ensaios confinados de fluência com geotêxteis não tecidos, cujos resultados foram exemplificados na Figura 2.20. O equipamento empregado nesses ensaios utiliza um corpo de prova instalado verticalmente e permite a aplicação de uma tensão normal ao plano do geossintético. A Figura 2.30 ilustra, esquematicamente, o sistema de confinamento empregado por McGown, Andrawes e Kabir (1982).

Figura 2.30 – Esquema do equipamento empregado em estudo pioneiro sobre o efeito do confinamento em solo na fluência dos geossintéticos (adaptado de MCGOWN; ANDRAWES; KABIR, 1982).

O equipamento utilizado por McGown, Andrawes e Kabir (1982) para avaliação do efeito do confinamento no comportamento em fluência de geotêxteis baseou-se no aparato convencional empregado em ensaios de fluência de geossintéticos. Percebe-se que foi usada uma câmara que envolve o corpo de prova e, a partir de bolsas de ar pressurizado, pôde-se controlar a tensão normal aplicada sobre os geossintéticos. Esse equipamento exemplifica a configuração na qual a solicitação de tração é aplicada diretamente ao geossintético por meio de garras, enquanto uma tensão confinante é aplicada ao corpo de prova. Apesar do seu desempenho satisfatório, destaca-se que o equipamento desenvolvido por McGown, Andrawes e Kabir (1982) impõe, devido ao posicionamento vertical do corpo de prova, uma variação na força aplicada ao longo do geossintético. Além disso, salienta-se a dificuldade na montagem desse ensaio. Outros estudos foram realizados com equipamentos que aplicam o mesmo princípio (COSTA, 1999; DING; TONG; ZHOU, 2008).

Os estudos do efeito do confinamento na fluência dos geossintéticos utilizando a configuração na qual o corpo de prova é diretamente submetido ao carregamento apresentam-se mais comumente na literatura. Contudo, são também encontrados diversos trabalhos nos quais os equipamentos basearam-se na segunda configuração, apresentada na Figura 2.29 (HELWANY; SHIH, 1998; COSTA, 2004; KAMIJI, 2006; KAMIJI; BUENO; COSTA, 2008). A fluência dos geossintéticos em condição de confinamento também foi estudada por outros meios. Entre eles, destacam-se os ensaios de arrancamento (JURAN, 1991; MIN et al., 1995), estudos em modelos de escala reduzida com aplicação de cargas verticais na superfície (KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, 2003; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, 2006; SIMONINI; GOTTARDI, 2003; ALAWAJI, 2005) e instrumentação e acompanhamento do comportamento em obras de reforço de solo (HULSE; PHILLIPS, 2002; BENJAMIM, 2006). Becker e Nunes (2002) ilustram, ainda, o efeito do confinamento na fluência de geossintéticos a partir de ensaios de arrancamento conduzidos com elementos de reforço inseridos em uma obra em escala real.

2.6. Fluência dos geossintéticos em projetos de solo reforçado

Os ensaios de laboratório conduzidos com geossintéticos representam condições idealizadas e, portanto, resultam em valores que não podem ser aplicados diretamente em projeto (KOERNER, 2005). A modificação dos procedimentos de ensaio de forma a obter uma reprodução das condições de campo poderia ser usada para contornar essa situação.

Contudo, essa medida é inviável técnica e economicamente na maioria dos casos. Assim, com o propósito de considerar esse aspecto, a prática atual para a definição da resistência admissível de geossintéticos empregados com a função de reforço baseia-se no uso de fatores de redução aplicados à resistência à tração do material, como indicado pela Equação 9 (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2001; VERTEMATTI, 2004; KOERNER, 2005). Esses fatores de redução refletem diversos parâmetros que influenciam na resistência desses materiais (e.g. danos de instalação, degradação química e biológica, fluência, incertezas na determinação de parâmetros) e podem ser determinados a partir de ensaios ou de referências na literatura (VERTEMATTI, 2004). A Tabela 2.1 apresenta os valores de fator de redução sugeridos por Koerner (2005) a serem aplicados em geotêxteis empregados no projeto de diferentes tipos de estruturas.

$$T_{adm} = \frac{T_{ult}}{FR_{DI} \times FR_F \times FR_{DQ} \times FR_{DB} \times f_m} \quad \text{Equação 9}$$

onde T_{adm} é a resistência à tração admissível do geossintético, T_{ult} é a resistência à tração do geossintético, obtida em ensaios de carregamento rápido (e.g. ABNT NBR 12824, ASTM D 4595, ASTM D 6637), FR_{DI} é o fator de redução devido a danos de instalação, FR_F é o fator de redução devido à fluência, FR_{DQ} é o fator de redução devido à degradação química, FR_{DB} é o fator de redução devido à degradação biológica e f_m é o fator de redução devido a incertezas inerentes à determinação dos parâmetros.

Tabela 2.1 – Valores de fator de redução sugeridos por Koerner (2005) para geotêxteis.

Aplicação	Danos de instalação	Fluência ¹	Degradação química	Degradação biológica
Muros reforçados	1,1 – 2,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Aterros reforçados	1,1 – 2,0	2,0 – 3,5	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Estabilização de taludes	1,1 – 1,5	2,0 – 3,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3
Rodovias não pavimentadas	1,1 – 2,0	1,5 – 2,5	1,0 – 1,5	1,0 – 1,2
Melhoria da capacidade de carga de fundação	1,1 – 2,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,5	1,0 – 1,3

¹Os limites inferiores referem-se a aplicações com vida útil curta e/ou situações nas quais a fluência não é crítica para o desempenho geral da obra.

O fator de redução que considera a fluência dos geossintéticos (FR_F) assume, comumente, os valores mais elevados. Sua definição baseia-se nas curvas de ruptura por fluência (Figura 2.7b), que representam o tempo para a ruptura por fluência em função da

solicitação de tração a qual o geossintético foi submetido no ensaio. A partir dessas curvas, extrapolam-se os resultados até que se atinja a vida útil da obra em dimensionamento e obtém-se a solicitação máxima que pode ser aplicada ao geossintético. Quando expresso em relação à resistência à tração do geossintético, o inverso desse valor ($T_{\text{fluência}}$) resulta no fator de redução por fluência. A Figura 2.31 ilustra esse procedimento a partir do gráfico exposto na Figura 2.7b.

Figura 2.31 – Obtenção do fator de redução por fluência.

Embora esse método para determinação do fator de redução apresente grande simplicidade, a extrapolação dos dados experimentais ainda gera incertezas inerentes ao próprio processo. Recomenda-se, portanto, que um número máximo de ciclos logarítmicos seja empregado nesse procedimento de extrapolação para que não haja perda de precisão. Essas sugestões variam entre um (ASTM D 5262; VERTEMATTI, 2004; JONES; CLARKE, 2007) e dois ciclos logarítmicos (SEGRESTIN; FREITAG, 2006). Outros autores dedicaram-se a estudar a precisão do método de extrapolação das curvas de ruptura por fluência dos geossintéticos (SANDSTRÖM; LINDÉ, 1999; KOERNER et al., 2001; GREENWOOD et al., 2000) e a comparação e sugestão de outros métodos (WRIGLEY, LIU; WANG, 2006, YUU; JEON; LEE, 2006).

O procedimento ilustrado na Figura 2.31 para determinação do fator de redução por fluência dos geossintéticos considera diversos aspectos relacionados a essa propriedade em um único parâmetro (e.g. redução da resistência devido à fluência, ruptura por fluência, deformações por fluência excessivas). Adicionado a isso, a influência do confinamento em

solo é um aspecto que pode, reconhecidamente, ser significativo no comportamento em fluência sob tração dos geossintéticos. Esses aspectos têm, portanto, levado a obtenção de fatores de redução conservadores (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).

Conforme ilustrado na Tabela 2.1, o fator de redução por fluência para geotêxteis variam entre 2 e 4 (KOERNER, 2005). Em geogrelhas, essa faixa de variação é mais estreita, entre 2 e 3 (KOERNER, 2005). Vertematti (2004) propõe valores gerais, sem distinção em relação ao tipo de geossintético, entre 2 e 5. Percebe-se, portanto, que o dimensionamento de obras de solo reforçado com geossintéticos considera uma redução entre 50 e 80% na resistência à tração do material devido, apenas, ao fenômeno da fluência. Quando os demais fatores de redução são considerados, essa diminuição pode ser ainda mais significativa.

Em adição a essa perspectiva, alguns estudos foram conduzidos para determinar a resistência à tração dos geossintéticos submetidos a diferentes períodos de fluência (HIRAKAWA et al., 2002; ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004; NAUGHTON; KEMPTON, 2006; JONES; CLARKE, 2007). Nesses estudos, foram conduzidos ensaios nos quais foi determinada a resistência residual de amostras de geossintéticos submetidas solicitações de tração constantes (fluência) por diferentes períodos, em laboratório e em campo. Esse tipo de ensaio demonstra que os geossintéticos conservam uma grande parcela de sua resistência à tração mesmo quando submetidos a esforços constantes (fluência). Esse aspecto apresenta grande importância quando são consideradas solicitações as quais os geossintéticos podem ser submetidos ao longo de sua vida útil que ultrapassem a solicitação máxima de projeto (e.g. terremotos). De fato, Greenwood, Brady e Watts (2002) afirmam que a resistência residual permanece praticamente sem alteração até imediatamente antes da ruptura.

Hirakawa et al. (2002) atestam que a resistência residual não é afetada pelo histórico de deformações por fluência. Essa conclusão baseou-se em diversos ensaios de tração nos quais os corpos de prova foram submetidos a diferentes combinações entre etapas de carregamento, períodos de fluência e etapas de descarregamento. Adicionalmente, Recker, Staubermann e Althoff (2008) verificaram a memória dos geossintéticos durante os ensaios de fluência. Esses autores realizaram ensaios convencionais, nos quais o carregamento foi removido por períodos pré-determinados e perceberam uma recuperação do nível de deformação anterior a essa remoção. Zornberg, Byler e Knudsen (2004) verificaram a resistência residual de vários corpos de prova de uma geogrelha de polipropileno submetida a ensaios convencionais e acelerados (SIM) de fluência. A resistência residual média obtida nos

ensaios foi igual a 95% da resistência à tração do material (Figura 2.32).

Figura 2.32 – Resistência residual após fluência com carregamentos iguais a 20 e 30% da resistência à tração comparada à curva de ruptura por fluência obtida com uma geogrelha de polipropileno (adaptado de ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004).

De maneira similar ao estudo desenvolvido por Zornberg, Byler e Knudsen (2004), Jones e Clarke (2007) examinaram a resistência residual de geossintéticos submetidos a ensaios convencionais e acelerados (SIM) de fluência. Contudo, esses autores incluíram, também, a aplicação de carregamentos sísmicos ao término do período de fluência por meio do incremento e diminuição da solicitação de tração. Entre as conclusões desse estudo, os autores puderam perceber que a resistência residual do geossintético não variou com a aplicação de diferentes combinações de solicitação (fluência e carregamentos sísmicos). Esse comportamento é apresentado também por Naughton e Kempton (2006). Diferentemente dos trabalhos discutidos anteriormente, esses autores avaliaram a resistência residual dos elementos de reforço de uma obra real a partir da exumação de amostras do material e ensaios de tração em laboratório. Essas amostras foram coletadas durante um período de 28 anos e os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 2.2. Percebe-se que não houve redução significativa na resistência residual média do material devido à fluência. De fato, esses autores destacam que a pequena redução encontrada em algumas amostras reflete os danos causados a ela durante a instalação ou ainda durante a exumação dos corpos de prova. Salientam, ainda, que não houve alteração no formato das curvas carregamento-deformação.

Tabela 2.2 – Resultados dos ensaios de tração conduzidos com amostras exumadas (NAUGHTON; KEMPTON, 2006).

Ano da exumação e ensaio	Resistência		Deformação na ruptura	
	Valor absoluto (kN/m)	Porcentagem do valor inicial	Valor absoluto (%)	Porcentagem do valor inicial
Inicial (1977)	31,30	100,0	11,40	100,0
1984	30,60	97,8	12,10	106,1
1990	31,40	100,3	12,80	112,3
1994	30,90	98,7	12,10	106,1
2005	31,04	99,2	12,68	111,2

Um gráfico tempo *versus* carregamento típico, como o ilustrado na Figura 2.31, considera que a fluência se assemelha a um processo de degradação do geossintético no qual a resistência do material é reduzida em função do tempo. Entretanto, a determinação da resistência residual de geossintéticos submetidos a diferentes períodos de fluência indica que a resistência do material é retida até o momento em que haja uma probabilidade de ruptura expressiva. Isso significa que o mecanismo de ruptura por fluência pode ser, na verdade, considerado como um fenômeno catastrófico, que apresenta poucos sinais de desenvolvimento até que as condições para ruptura apareçam (e.g. ruptura de uma pequena porcentagem das fibras de um geotêxtil) (GREENWOOD; BRADY; WATTS, 2002). O tipo de ruptura por fluência em geossintéticos ocorre, portanto, rapidamente ao término da vida útil do material. Esse tipo de degradação é descrita por Greenwood, Brady e Watts (2002) como degradação do modo 3, conforme ilustrado na Figura 2.33, juntamente com outros dois tipos (modos 1 e 2).

Figura 2.33 – Modos de degradação (GREENWOOD; BRADY; WATTS, 2002).

A degradação do modo 1 é caracterizada quando a redução da resistência ocorre imediatamente, no início da vida útil do material (e.g. danos de instalação). É nítido, portanto, que os fatores de redução aplicados a fenômenos que se apresentam como o modo 1 de degradação devem ser aplicados imediatamente e ter seu efeito independente do tempo. O modo 2, por sua vez, caracteriza-se por uma dependência em relação ao tempo, e.g. a redução da resistência devido à degradação química ou biológica. Assim, os fatores de redução do modo 2 devem considerar a variável tempo e não podem ser considerados como um valor único. Por fim, o modo 3 ilustra os fenômenos nos quais a redução da resistência ocorre no fim da vida útil do material (e.g. fluência). Nesse modo, um fator de redução aplicado à carga é inadequado. Por outro lado, quaisquer fatores de redução devem ser aplicados ao tempo, e não ao carregamento, e deve-se fazer uma previsão do tempo de ruptura e sua variabilidade (GREENWOOD; BRADY; WATTS, 2002). A consideração da fluência como um processo de degradação do modo 3 levou a elaboração de novos métodos para determinação do fator de redução que considera esse aspecto (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004; NAUGHTON; KEMPTON, 2006; KONGKITKUL; TATSUOKA; HIRAKAWA, 2007).

2.7. Considerações finais

Este capítulo apresentou o fenômeno da fluência em geossintéticos e ilustrou a importância de sua caracterização. Essa propriedade encontra-se entre as mais importantes no desenvolvimento de projetos geotécnicos onde os geossintéticos possuem a função de reforço ou estão submetidos a solicitações durante a vida útil da obra. Conforme exposto anteriormente, diversos fatores afetam a fluência dos geossintéticos, e.g. tipo de polímero e de geossintético, velocidade de aplicação e nível de carregamento, temperatura, confinamento em solo. Assim, a caracterização desses parâmetros é fundamental para o estudo do fenômeno da fluência nesses materiais.

As investigações sobre a fluência em geossintéticos comumente contam com um procedimento de laboratório normalizado e de baixa complexidade, denominado nesta tese como ensaios convencionais de fluência em geossintéticos. Além desses ensaios, diversas experiências são relatadas na literatura técnica para determinação do comportamento em fluência dos geossintéticos em diferentes condições e com objetivos distintos, ora para acelerar a definição dessa propriedade em determinado material, ora para simular condições encontradas em situações reais de campo. Assim, os ensaios acelerados, com elevação da

temperatura de ensaio, e confinados, para reproduzir o confinamento em solo, são alternativas empregadas para contornar aspectos inerentes aos ensaios convencionais de fluência em geossintéticos. Contudo, percebe-se uma lacuna que seria preenchida pelo estabelecimento de um procedimento de laboratório que permita a execução de ensaios simultaneamente acelerados e confinados. Assim, a combinação de ambas as técnicas em um único procedimento possibilitaria a união das vantagens encontradas em cada uma delas e, conseqüentemente, a consideração do comportamento em fluência dos geossintéticos sob uma nova perspectiva.

3. Desenvolvimento do equipamento

Um novo equipamento que permite a realização de ensaios simultaneamente confinados e acelerados de fluência em geossintéticos foi desenvolvido nesta pesquisa. Este capítulo expõe as principais dificuldades encontradas durante a fase de desenvolvimento desse equipamento. Em seguida, descreve-se a configuração final adotada, juntamente com as calibrações e verificações realizadas.

O princípio geral de funcionamento do equipamento de fluência de geossintéticos desenvolvido nesta pesquisa se assemelha àquele proposto por McGown, Andrawes e Kabir (1982). Nessa configuração, aplica-se uma tensão normal ao corpo de prova de geossintético, submetendo-o ao mesmo tempo a uma solicitação de tração através de garras externas à câmara de confinamento. Embora siga o mesmo princípio, o novo equipamento apresenta diferenças em relação àquele desenvolvido por McGown, Andrawes e Kabir (1982). Os itens a seguir apresentam a concepção inicial do equipamento e as características que foram modificadas durante o seu desenvolvimento.

3.1. Concepção inicial

A concepção inicial do novo equipamento de fluência de geossintéticos estabelece um aparato onde os corpos de prova seriam posicionados horizontalmente em uma câmara especial e, então, solicitados em tração por meio de garras conectadas a pesos livres. Essa câmara especial possibilitaria a reprodução das tensões confinantes de solo sobre o corpo de prova através de um meio confinante e uma bolsa de ar pressurizado. Além disso, a temperatura de ensaio seria elevada por meio de ventiladores e resistências elétricas instaladas no interior da câmara de ensaio. A Figura 3.1 apresenta um esquema da concepção inicial do novo equipamento de fluência de geossintéticos.

Figura 3.1 – Concepção inicial do novo equipamento para realização de ensaios de fluência de geossintéticos.

O aparato para ensaios de fluência em geossintéticos foi inicialmente concebido para acomodar um corpo de prova (200 x 200 mm) no interior da câmara de ensaio, circundado por um meio confinante. Essa câmara seria montada sobre uma bancada para permitir a aplicação do carregamento constante através de pesos livres e estaria envolvida com uma cobertura em poliestireno expandido. Ventiladores e resistências elétricas seriam empregados para elevar a temperatura do conjunto formado pelo solo e o corpo de prova. Salienta-se que esses elementos (ventiladores, resistências elétricas e cobertura de poliestireno expandido) não são apresentados na Figura 3.1. Células de carga instaladas entre os pesos livres e as garras possibilitariam o registro e controle da solicitação de tração a que os corpos de prova estariam submetidos durante cada ensaio. Foram propostas garras do tipo mordente instaladas no interior da câmara de ensaio e que teriam passagem livre para o seu lado externo. O alongamento do corpo de prova seria acompanhado por leituras de deslocamento das garras através de um relógio comparador.

Um sistema para reprodução das tensões normais sobre o corpo de prova foi idealizado no projeto inicial do novo equipamento. Esse sistema consiste de uma bolsa de ar pressurizado conectada a um painel de controle, que é ligado ao sistema de ar pressurizado do laboratório. Assim, o operador do ensaio seria capaz de aplicar uma pressão constante no interior da bolsa de ar pressurizado durante os ensaios onde o corpo de prova estaria submetido a uma tensão normal.

Um segundo sistema previsto no novo equipamento diz respeito à elevação da temperatura de ensaio. Inicialmente, previu-se a utilização de ventiladores e resistências elétricas para a circulação de ar aquecido no interior da câmara de ensaios, em concordância

com trabalhos previamente desenvolvidos no Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (BARAS, 2001; CONSTANZI, 2003). Contudo, devido à necessidade de elevar a temperatura em ensaios onde os corpos de prova estariam inseridos no meio confinante, a circulação de ar se tornaria ineficaz. Optou-se, portanto, por utilizar resistências elétricas para aquecer todo o sistema formado pelo corpo de prova e o meio confinante. Essas resistências elétricas seriam instaladas no interior da câmara de ensaio e possibilitariam o aumento da temperatura de ensaio para o valor desejado pelo operador.

3.2. Alterações na configuração inicial do equipamento

A configuração inicialmente concebida do novo equipamento de fluência de geossintéticos sofreu alterações ainda durante a fase de desenvolvimento. Os itens a seguir descrevem tais modificações.

3.2.1. Pesos livres

A utilização direta de pesos livres foi inicialmente prevista no desenvolvimento do novo equipamento de fluência de geossintéticos. Percebeu-se que o nível de carregamento a ser aplicado nos corpos de prova impossibilitaria o uso desse sistema como idealizado a princípio. Assim, apesar de ter sido mantido o uso de pesos livres, algumas alterações foram propostas para facilitar o emprego de carregamentos mais elevados. Inicialmente, foi sugerida a utilização de um sistema de alavanca automatizado, tecnologia já em funcionamento no Laboratório de Geossintéticos. Seria elaborada uma nova configuração que atendesse às exigências desse novo sistema. A Figura 3.2 apresenta a proposta de uso de alavancas para a aplicação do carregamento.

A inserção de uma alavanca para aplicação da solicitação de tração no corpo de prova faz uso de um princípio simples para multiplicar o carregamento aplicado pelos pesos livres. Contudo, para a manutenção de uma solicitação constante no corpo de prova, é necessário que a alavanca permaneça nivelada horizontalmente durante todo o ensaio de fluência. Um motor elétrico é, portanto, previsto para ajustar a posição da alavanca, uma vez que as deformações por fluência do corpo de prova provocarão um desnivelamento na mesma.

Um sensor de contato instalado no braço de alavanca aciona o motor elétrico quando o nivelamento horizontal é perdido. A ativação do motor elétrico movimenta a polia móvel, destacada na Figura 3.2, para baixo, até que a alavanca atinja o nível horizontal novamente e toque no sensor de contato.

Figura 3.2 – Proposta de sistema de alavanca para aplicação da solicitação de tração no corpo de prova.

O sistema de alavanca apresenta algumas desvantagens. Primeiramente, devido ao uso do motor elétrico para correção da posição da alavanca, é necessário um fornecimento de energia elétrica contínuo. Em segundo lugar, uma vez que o novo equipamento para ensaios de fluência em geossintéticos prevê a aplicação do carregamento por ambas as extremidades dos corpos de prova, dois conjuntos de alavancas seriam utilizados. Assim, limitações no espaço físico do laboratório restringiram o uso desse sistema.

Como alternativa para elevar as solicitações de tração com o uso de pesos livres, optou-se por instalar uma associação de polias. Dessa forma, foi adotado um conjunto de polias móveis e fixas, numa configuração conhecida por cadernal ou moitão. Esse sistema é compacto e resulta em uma vantagem mecânica igual ao dobro do número de polias móveis utilizadas. Adicionalmente, cada polia e o cabo empregados são submetidos a solicitações iguais. Verificou-se, a partir de cálculos preliminares, que seria necessário utilizar uma associação com três móveis e duas fixas. A Figura 3.3 ilustra o efeito de um conjunto com esse número de polias e apresenta os elementos adotados no projeto do novo equipamento de fluência em geossintéticos.

Figura 3.3 – a) Efeito da associação de cinco polias (três móveis e duas fixas); b) Elementos adotados no projeto do novo equipamento de fluência em geossintéticos para elevar a solicitação de tração aplicada por pesos livres.

A configuração ilustrada na Figura 3.3 utiliza dois grupos de polias. O grupo de polias móveis é formado por três elementos e deverá estar conectado ao corpo de prova por meio de um cabo de aço e garra. Duas polias fixas compõem o segundo grupo, que deverá ser conectado à estrutura do novo equipamento por meio de parafusos. Embora apresente uma vantagem mecânica teórica igual a 6, o peso próprio do conjunto de polias móveis conduz a um valor diferente. Assim, a vantagem mecânica deverá ser determinada a partir de um processo de calibração. O aspecto final do sistema de aplicação do carregamento auxiliado pelo conjunto de polias é ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Proposta para o sistema de aplicação do carregamento com auxílio da associação de polias.

3.2.2. Garras

A concepção inicial do novo equipamento prevê a utilização de garras do tipo mordente. Essas garras estão sujeitas ao deslizamento relativo entre as mesmas e os corpos de prova durante a aplicação do carregamento e, também, ao longo dos ensaios de fluência. Essa condição se torna ainda mais influente quando cargas mais elevadas são aplicadas aos corpos de prova. Com o propósito de contornar este empecilho, as garras do tipo mordente propostas inicialmente foram substituídas por garras do tipo rolete, que permitem a fixação do corpo de prova com maior segurança em relação ao deslizamento relativo garra-corpo de prova. Adicionalmente, as garras do tipo rolete serão montadas sobre trilhos que permitam baixo atrito. A Figura 3.5 ilustra a garra do tipo rolete adotada.

Figura 3.5 – Garra do tipo rolete adotada no novo equipamento para realização de ensaios de fluência de geossintéticos.

A utilização de garras do tipo rolete levou à mudança do posicionamento das mesmas em relação à câmara de ensaio. Assim, o conjunto das garras e dos trilhos foi posicionado no lado externo da câmara de ensaio, nas duas extremidades da bancada, possibilitando uma amplitude maior de movimento das garras e maiores deformações nos corpos de prova. A localização das células de carga também foi alterada para acomodar a nova garra. O novo posicionamento destes elementos é apresentado na Figura 3.6

Figura 3.6 – Posicionamento da garra do tipo rolete e da célula de carga adotado no novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos.

3.2.3. Medição do alongamento dos corpos de prova

O alongamento dos corpos de prova utilizados no novo equipamento de fluência seria mensurado a partir de leituras de deslocamento das garras. Estas leituras seriam proporcionadas por relógios comparadores instalados sobre a bancada onde se localizaria a câmara de ensaio, como ilustrado na Figura 3.1.

Embora a determinação das deformações dos corpos de prova por meio do deslocamento das garras seja uma prática comum em alguns ensaios em geossintéticos (e.g. resistência a tração, fluência), esse sistema não se mostra viável no novo equipamento. A proposta do novo equipamento é medir o deslocamento de pontos conhecidos no interior da câmara de ensaio, com o corpo de prova submetido a tensões normais e, assim, permitir o cálculo das deformações durante os ensaios de fluência. Optou-se, portanto, por utilizar outro sistema para calcular as deformações dos corpos de prova durante os ensaios. Esse sistema utiliza fios de aço fixados ao corpo de prova em uma de suas extremidades e, na outra, a pesos metálicos. Uma vez que a deformabilidade dos fios de aço quando em solicitação de tração é significativamente maior que aquela característica dos geossintéticos empregados nesta pesquisa, esses fios são considerados inextensíveis e serão referenciados dessa forma ao longo desta tese. Em seguida, determinam-se os deslocamentos dos pesos metálicos, que são considerados iguais aos deslocamentos dos pontos onde os fios de aço estão fixados ao corpo de prova. A medição do deslocamento de dois pontos permite o cálculo da deformação média

entre os mesmos. A Figura 3.7 ilustra a modificação do sistema de medição do alongamento dos corpos de prova.

Figura 3.7 – Sistema de medição do alongamento dos corpos de prova adotado no novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos.

3.2.4. Câmara de ensaio

O conceito inicial do novo equipamento de fluência prevê um compartimento único na câmara de ensaio, que abrigaria o corpo de prova, o meio confinante e também as resistências elétricas responsáveis pela elevação da temperatura de ensaio. Contudo, verificou-se a necessidade de instalação das resistências elétricas em um compartimento separado daquele onde o meio confinante e os corpos de prova seriam dispostos. Isso se deve à necessidade de um volume de material confinante conhecido com precisão para calcular a sua massa específica após a compactação, a partir do controle da massa lançada no interior da câmara de ensaio. Dessa forma, a presença das resistências elétricas no mesmo compartimento dificultaria a determinação do seu volume. Optou-se, portanto, por criar um compartimento inferior, onde as resistências elétricas foram instaladas, e cuja tampa é, na verdade, o fundo do compartimento superior. Essa configuração resultou em um volume de material confinante conhecido no compartimento superior. A Figura 3.8 ilustra a divisão da câmara de ensaio em dois compartimentos.

Figura 3.8 – Divisão da câmara de ensaios em dois compartimentos, adotada no novo equipamento para realização de ensaios de fluência em geossintéticos.

3.2.5. Configuração dos corpos de prova

A proposta inicial do novo equipamento de fluência em geossintéticos prevê a utilização de corpos de prova com 200 mm de largura e 200 mm de comprimento. Com a alteração do equipamento para garras do tipo rolete, surgiu a necessidade de empregar corpos de prova mais longos. Assim, corpos de prova com, no mínimo, 1.100 mm de comprimento são prescritos para os ensaios com o novo equipamento. Estes seriam inseridos no interior da câmara de ensaios, circundados pelo meio confinante e, então, conectados às garras. Dessa forma, os corpos de prova estariam posicionados de uma extremidade a outra do equipamento.

Uma série de ensaios-teste com um geotêxtil não-tecido foi realizada para verificar a resposta do corpo de prova nessas dimensões. O comportamento percebido não foi aceitável. A Figura 3.9 mostra o aspecto final do corpo de prova após a sua utilização no primeiro ensaio-teste (ensaio confinado de fluência, em areia). Percebe-se claramente que as deformações ocorreram na porção do corpo de prova externa à câmara de ensaios. Esse comportamento era esperado pois, uma vez que o geossintético estava confinado, as deformações ocorreriam mais expressivamente nessas partes do corpo de prova. Isso levou as garras ao fim de seus cursos rapidamente. O deslocamento dos elementos metálicos ligados aos fios inextensíveis foi nulo, indicando que a região do corpo de prova no interior da câmara de ensaios não sofreu nenhum alongamento.

Figura 3.9 – Aspecto do corpo de prova após a sua utilização em ensaio-teste confinado de fluência conduzido no novo equipamento e destaque para o ponto de fixação do fio inextensível.

A partir do primeiro ensaio-teste percebeu-se a necessidade de reforçar os corpos de prova nas partes externas à câmara de ensaio de forma a torna-las rígidas em relação ao trecho situado no interior da mesma. A primeira alternativa testada como reforço do corpo de prova consistiu na aplicação de cola de contato. A cola foi lançada sobre um corpo de prova de geotêxtil não tecido e espalhada com uma espátula. Adicionalmente, optou-se por estender a região reforçada também para o interior da câmara de ensaios de forma a delimitar uma faixa de interesse no centro do corpo de prova com 100 mm de comprimento. Dessa forma, as dimensões estabelecidas nos ensaios normalizados de fluência (200 mm de largura e 100 mm de comprimento) seriam reproduzidas. Após a cura da cola de contato, o corpo de prova foi submetido a um ensaio confinado de fluência no novo equipamento. A Figura 3.10 ilustra o aspecto do corpo de prova reforçado com cola de contato antes e após a sua utilização no segundo ensaio-teste (ensaio confinado de fluência, em areia).

Figura 3.10 – Aspecto do corpo de prova reforçado com cola de contato antes (a) e após (b) a sua utilização em ensaio-teste confinado de fluência conduzido no novo equipamento.

O corpo de prova reforçado com cola de contato apresentou um desempenho insatisfatório. Como pode ser percebido na Figura 3.10b, as regiões reforçadas sofreram estricção, fazendo com que as garras alcançassem seu curso máximo em um tempo incompatível com os ensaios de fluência. Foi necessário, portanto, promover um reforço ainda mais rígido em relação ao geossintético. Isto foi avaliado a partir de outros métodos de aplicação da cola de contato, mas nenhum deles resultou em desempenho satisfatório do corpo de prova.

As configurações anteriores mostraram que o atrito entre o meio confinante e as regiões reforçadas dos corpos de prova foi excessivo. Dessa forma, também foi necessário criar uma interface de baixo atrito nas regiões reforçadas para que mitigar a redução na solicitação de tração que atinge a faixa de interesse do corpo de prova. Uma folha fina de poliéster foi colada às duas faces das regiões reforçadas dos corpos de prova com o intuito de reduzir o atrito dessa porção com o meio confinante. Porém, devido à baixa rigidez da região reforçada, esta permaneceu sofrendo estricção e perdendo o contato com a folha de poliéster em algumas montagens. Verificou-se, portanto, a necessidade de solucionar primeiramente a questão da rigidez da região reforçada para, em seguida, reduzir o seu atrito com o solo.

Um novo material adesivo foi proposto para reforçar os corpos de prova. Este material consiste em um adesivo bicomponente à base de resina epóxi, aplicado sobre os dois lados do corpo de prova e espalhado com uma espátula. Após a cura do adesivo, as regiões reforçadas foram recobertas com uma folha de poliéster idêntica àquela citada no parágrafo anterior, colada com o mesmo adesivo em sua porção mais próxima à faixa de interesse (10 mm de espessura). Este corpo de prova foi, então, submetido a um ensaio confinado de fluência no novo equipamento. A Figura 3.11 ilustra o seu aspecto ao término deste ensaio.

Figura 3.11 – Aspecto do corpo de prova reforçado com adesivo bicomponente à base de resina epóxi e recoberto com folha de poliéster após a sua utilização em ensaio-teste confinado de fluência conduzido no novo equipamento.

A estricção da região reforçada com o adesivo bicomponente foi reduzida consideravelmente em comparação com os corpos de prova reforçados com cola de contato. Contudo, verificou-se um deslizamento relativo entre a folha de poliéster e o corpo de prova, como destacado na Figura 3.11. Assim, realizou-se uma melhoria no contato dessa interface e utilizou-se um sistema para promover a redução do atrito da região reforçada do corpo de prova com o meio confinante. Uma nova metodologia foi realizada para cumprir estes dois requisitos. Primeiramente, o recobrimento da região reforçada do corpo de prova com a folha de poliéster foi realizado antes da cura do adesivo bicomponente, imediatamente após a aplicação do adesivo sobre os dois lados do corpo de prova. Assim, formou-se um compósito constituído pelo corpo de prova, o adesivo espalhado em suas duas faces e dois pedaços da folha de poliéster, envolvendo todo o conjunto. Por fim, a cura do adesivo foi feita sob tensão normal. Esse processo resultou em regiões reforçadas extremamente rígidas, delimitando perfeitamente a faixa de interesse do corpo de prova.

A segunda modificação necessária na configuração anterior do corpo de prova refere-se à redução do atrito entre a sua região reforçada e o meio confinante. O processo de cura com adesivo bicomponente produziu regiões reforçadas suficientemente rígidas. Dois pares de geomembranas de polietileno de alta densidade, rígidas, foram posicionados em contato com as regiões reforçadas do corpo de prova, acima e abaixo do mesmo. Dessa forma, o meio confinante não estaria diretamente em contato com as regiões reforçadas dos corpos de prova. Adicionalmente, empregou-se um lubrificante aplicado entre as geomembranas e as regiões reforçadas do corpo de prova para garantir coeficientes de atrito de interface mais baixos. A Figura 3.12 ilustra o aspecto do corpo de prova utilizado em um ensaio confinado de fluência com o novo equipamento.

Figura 3.12 – Aspecto do corpo de prova reforçado com adesivo bicomponente à base de resina epóxi e posicionado entre geomembranas de polietileno de alta densidade lubrificadas antes (a) e após (b) a remoção do novo equipamento.

A união das duas últimas modificações citadas conferiu um desempenho satisfatório em relação àquele esperado para os ensaios de fluência no novo equipamento. Verificou-se que a estricção do corpo de prova ocorreu apenas na sua faixa de interesse. Dessa forma, este procedimento de preparação e instalação do corpo de prova foi tomado como padrão em todos os ensaios conduzidos com o novo equipamento onde o corpo de prova está submetido a tensões normais. Os itens 3.3.1 e 3.4.1 apresentam estes procedimentos com maiores detalhes.

3.3. Configuração final do equipamento

O novo equipamento desenvolvido nesta pesquisa é capaz de conduzir ensaios de fluência em geossintéticos simultaneamente confinados e acelerados. Diferentes sistemas foram introduzidos ao equipamento para permitir a reprodução das condições desejadas em cada ensaio. Assim, o novo equipamento possui sistemas responsáveis pela aplicação do carregamento, medição do alongamento do corpo de prova, reprodução do confinamento do solo, elevação e manutenção da temperatura de ensaio e aquisição dos dados. A Figura 3.13 apresenta uma vista lateral esquemática do novo equipamento e uma fotografia de um ensaio em execução, salientando-se que os elementos indicados em uma de suas extremidades repetem-se no seu lado oposto.

Figura 3.13 – a) Vista lateral esquemática do novo equipamento de ensaios de fluência em geossintéticos; b) Fotografia de um ensaio em execução.

Uma vez fixada à parte superior, a tampa da câmara de ensaio funciona como reação à pressão de ar aplicada na bolsa inflável (29,5 mm de altura), aumentando a tensão vertical sobre o solo e, conseqüentemente, sobre o corpo de prova. As paredes laterais da câmara de ensaio possuem aberturas com 300 mm de largura e 5 mm de espessura, que permitem o acesso do corpo de prova ao lado externo da mesma. Dessa forma, a parte do corpo de prova externa à câmara de ensaio é fixada às garras do tipo rolete. Estas garras são conectadas por cabos de aço a pesos livres, responsáveis por aplicar o carregamento de tração constante ao geossintético. Adicionalmente, um conjunto de polias foi instalado para multiplicar a solicitação proveniente dos pesos livres. A aplicação do carregamento é realizada por meio de macacos hidráulicos que apoiam os pesos livres antes do início do ensaio. A solicitação de tração a que o corpo de prova é submetido é verificada continuamente durante os ensaios por células de carga.

O alongamento do geossintético é medido por transdutores de deslocamento ligados a pontos conhecidos do corpo de prova através de fios de aço inextensíveis. Estes pontos se encontram no interior da câmara de ensaio, fixados em uma faixa de interesse do corpo de prova, na qual as tensões normais são aplicadas. Assim, o corpo de prova utilizado no novo equipamento deve ser submetido a um processo de preparação que prevê a instalação dos fios inextensíveis e o reforço do mesmo na região externa à faixa de interesse. Os elementos indicados na Figura 3.13 serão descritos mais detalhadamente nos itens seguintes deste capítulo.

3.3.1. Corpos de prova

Os ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento utilizam corpos de prova de geossintético com 200 mm de largura e 1.100 mm de comprimento. Esse valor de comprimento dos corpos de provas é necessário para permitir a fixação dos mesmos nas garras do equipamento. A faixa de interesse onde a fluência se processa encontra-se no centro dos corpos de prova, com comprimento de 100 mm. Ela é delimitada por duas regiões do reforçadas com um adesivo bicomponente à base de resina epóxi, que apresenta secagem em 90 minutos e cura total em 24 horas (Araldite Profissional 24 horas®). Estas regiões são recobertas por uma folha de poliéster com 0,075 mm de espessura (Mylar® *sheet*) com o objetivo de reduzir o atrito das áreas reforçadas dos corpos de prova com o solo circundante. Estabeleceu-se, com esse procedimento, a proporção largura-comprimento recomendada para

ensaios de tração e fluência de geossintéticos em faixa larga (2:1). A Figura 3.14 ilustra a sequência de preparação e as dimensões dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa.

Figura 3.14 – Fases da preparação (a) e dimensões (b) dos corpos de prova utilizados no novo equipamento.

A preparação do corpo de prova é concluída com a instalação dos fios inextensíveis utilizados para medição do alongamento do mesmo durante os ensaios de fluência no novo equipamento. Assim, dois fios inextensíveis são amarrados na faixa de interesse dos corpos de prova, com uma distância de 60 a 95 mm entre eles. Em seguida aplica-se uma cola bicomponente à base de resina epóxi, com tempo de secagem de 10 minutos e cura total em 24 horas (Araldite Hobby 10 minutos®). Finaliza-se o procedimento com a espera do tempo de cura das colas utilizadas.

Ensaio de ruptura por fluência também foram executados nesta pesquisa, como será apresentado no item 4.3. Foi adotada uma configuração diferente nos corpos de prova empregados devido ao valor elevado das solicitações de tração aplicadas nesses ensaios. Assim, uma vez que apenas geogrelhas foram submetidas a esses ensaios, utilizou-se um menor número de elementos submetidos aos esforços de tração. Em adição a isso, corpos de prova de uma das geogrelhas empregadas nesta pesquisa foram extraídos da mesma porção da amostra do material e submetidos a ensaios padronizados de fluência para verificar a influência do número de elementos submetidos à solicitação de tração. Os resultados desses ensaios são apresentados e discutidos no item 5.3.1. A determinação do número de elementos

a ser empregado baseou-se nas limitações do novo equipamento em relação à quantidade de pesos livres que poderiam ser utilizados com segurança. Além disso, considerou-se também o nível de carregamento ao qual o corpo de prova estaria submetido.

3.3.1.1. Verificação da resistência ao cisalhamento de interface entre as superfícies lisas das geomembranas e os corpos de prova

Conforme será apresentado na descrição do procedimento de montagem dos ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento (item 3.4), são utilizadas geomembranas de polietileno de alta densidade lubrificadas para garantir que a solicitação de tração registrada pelas células de carga seja aproximadamente igual a que atinge a faixa de interesse dos corpos de prova, no interior da câmara de ensaio. Surgiu, portanto, a preocupação em determinar o coeficiente de atrito da interface entre a geomembrana e a região reforçada do corpo de prova. Contudo, essa verificação foi realizada apenas após a conclusão dos ensaios de fluência, uma vez que não fazia parte do planejamento inicial do projeto de pesquisa proposto e seria sugerida como atividade subsequente a esta pesquisa.

O ângulo de atrito da interface geomembrana-corpo de prova foi determinado a partir de ensaios de cisalhamento direto. Esses ensaios foram realizados com equipamento fabricado por Testop Indústria e Comércio Ronald Top Ltda., modelo 34.4.4, a uma taxa de deslocamento horizontal igual a 0,5 mm/minuto. As leituras de força horizontal foram obtidas a partir de um anel dinamométrico produzido por Wykeham-Farrance Ltd., com capacidade nominal de 245,2 N (25 kgf). A Figura 3.15 ilustra o processo de montagem dos ensaios de cisalhamento direto de interface conduzidos nesta pesquisa.

Foram utilizados blocos de madeira para permitir o contato entre os materiais empregados nos ensaios de cisalhamento de interface. Assim, dois blocos foram preparados (Figura 3.15a). O primeiro deles foi recoberto por uma amostra da geomembrana de PEAD usada nos ensaios confinados de fluência conduzidos com o novo equipamento. A fixação da geomembrana ao bloco de madeira foi realizada por meio da cravação de pregos. Uma porção da região reforçada de um corpo de prova foi colada ao segundo bloco de madeira. O referido corpo de prova foi preparado de maneira idêntica àqueles usados nos ensaios executados nesta pesquisa com o novo equipamento (item 3.3.1).

Figura 3.15 – Montagem dos ensaios de cisalhamento direto para avaliação da resistência ao cisalhamento da interface entre geomembrana e os corpos de prova: a) Materiais fixados a blocos de madeira; b) Geomembrana posicionada no anel inferior da máquina de cisalhamento direto; c) Vaselina industrial aplicada sobre a geomembrana; d) Posicionamento do anel superior da máquina de cisalhamento direto; e) Bloco de madeira com amostra do corpo de prova posicionado sobre a vaselina industrial; f) Montagem concluída.

A montagem dos ensaios de cisalhamento direto de interface foi iniciada a partir do posicionamento do bloco de madeira com geomembrana no anel inferior da caixa de ensaio (Figura 3.15b). Em seguida, uma camada de vaselina industrial foi lançada sobre a geomembrana, cobrindo-a completamente (Figura 3.15c). Posicionou-se, então, o anel superior da caixa de ensaio e, posteriormente, o segundo bloco de madeira, colado ao corpo de prova (Figura 3.15d e Figura 3.15e, respectivamente). Por fim, o restante do equipamento foi montado, a tensão normal aplicada e deu-se início ao movimento horizontal do anel inferior, similarmente aos ensaios de cisalhamento direto convencionais.

Os ensaios de cisalhamento da interface corpo de prova-geomembrana foram realizados em diferentes níveis de tensão normal (30, 60, 100 e 150 kPa). Uma vez que os valores de pico das curvas deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante foram atingidos em baixos valores de deslocamentos horizontal do anel inferior da caixa de ensaio, os ensaios foram paralisados com 10 mm de deslocamento horizontal. A Figura 3.16 apresenta as curvas deslocamento horizontal *versus* tensão de cisalhamento de interface em quatro níveis de tensão normal. Adicionalmente, é mostrada a envoltória resultante dessa série de ensaios e obtida a partir da tensão cisalhante máxima determinada para cada valor de tensão normal.

Figura 3.16 – a) Curvas deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante obtidas nos ensaios de cisalhamento direto da interface entre as regiões reforçadas dos corpos de prova e a face lisa das geomembranas; b) Envoltória de resistência resultante dessa série de ensaios.

Os valores máximos de tensão cisalhante foram atingidos com deslocamentos horizontais menores que 2,2 mm. Percebe-se na Figura 3.16a que as curvas deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante possuem a mesma inclinação até que a ruptura seja atingida. Apenas o ensaio de cisalhamento direto executado com tensão normal igual a 30,9 kPa não seguiu esse comportamento. Isto ocorreu devido ao baixo valor de força horizontal em relação à capacidade do anel dinamométrico empregado. Assim, optou-se por descartar este ensaio e obter a envoltória de resistência ao cisalhamento considerando-se apenas os demais níveis de tensão normal utilizados (Figura 3.16b).

Os resultados apresentados neste item foram empregados para estimar a solicitação de tração que atinge as áreas de interesse dos corpos de prova. Determinou-se, portanto, a força de atrito desenvolvida no contato entre as geomembranas e os corpos de prova e, em seguida, este valor foi subtraído dos valores registrados pelas células de carga em cada ensaio. Esse cálculo é apresentado no item 4.3.

3.3.2. Sistema para reprodução do confinamento

O preenchimento do compartimento superior da câmara de ensaio com solo tem o propósito de simular o meio confinante do corpo de prova. As tensões verticais atuantes sobre o corpo de prova foram reproduzidas por meio da aplicação de ar pressurizado em uma bolsa inflável de policlloreto de vinila (PVC), reforçado com malha de polietileno de alta densidade (PEAD), fornecida por Formatto Coberturas Especiais Ltda. Um geotêxtil não-tecido de

poliéster (313 g/m² e 2,59 mm de espessura) foi posicionado entre o meio confinante e a bolsa de ar pressurizado para evitar que esta fosse danificada pelo solo. Por fim, a tampa da câmara de ensaio é posicionada e fixada por meio de parafusos às paredes da câmara. Essa tampa é fabricada com uma chapa metálica idêntica àquela utilizada na manufatura da câmara de ensaio e possui um orifício pelo qual uma mangueira interliga a bolsa inflável à rede de ar pressurizado do laboratório. A Figura 3.17 apresenta a sequência para colocação da bolsa de ar pressurizado e fechamento da câmara de ensaio.

Figura 3.17 – Sequência para colocação da bolsa de ar pressurizado e fechamento da câmara de ensaio.

Testes preliminares do sistema de reprodução do meio confinante foram conduzidos para sua avaliação. A configuração apresentada permitiu a aplicação de pressão de ar igual a 150 kPa no interior da bolsa inflável sem a ocorrência de vazamentos. Este valor é superior a todos aqueles utilizados nos ensaios realizados no novo equipamento de fluência em geossintéticos, numa razão maior ou igual a três.

A montagem dos ensaios confinados e confinado-acelerados prevê a utilização de corpos de prova circundados por um meio confinante (areia ou solo) e submetidos a uma tensão normal constante. Esta, por sua vez, deve ser aplicada por meio de uma bolsa de ar pressurizado, posicionada sobre o meio confinante, que utiliza a tampa da câmara de ensaios como reação. Foi necessário, portanto, verificar o sistema de reprodução do confinamento em relação às pressões aplicadas na bolsa de ar e à distribuição das tensões verticais totais no

interior da câmara de ensaios. Adicionalmente, a estabilidade deste sistema também foi avaliada. Essas verificações são apresentadas a seguir.

3.3.2.1. Verificações do sistema para reprodução do confinamento

O sistema para reprodução do confinamento implantado no novo equipamento de fluência em geossintéticos foi avaliado em relação à distribuição das tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios, às tensões horizontais totais desenvolvidas devido a aplicação de um carregamento vertical e à estabilidade do sistema em ensaios de longa duração. Salienta-se que a verificação da distribuição das tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios foi conduzida em duas montagens: câmara de ensaio preenchida apenas com areia; e com a presença do corpo de prova e demais elementos (montagem completa).

3.3.2.1.1. Tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios preenchida apenas com areia

A verificação das tensões verticais totais próximas à bolsa de ar pressurizado foi realizada através do preenchimento da câmara de ensaios com areia e da utilização de células de tensão total posicionadas a 12 mm de profundidade. Adicionalmente, um segundo conjunto de células de tensão total foi distribuído a 88 mm de profundidade. A localização de ambos os conjuntos é apresentada na Figura 3.18. Foram empregadas células manufaturadas e fornecidas por Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd., modelos BEC-A-200KP e BEC-A-500KP, com capacidade nominal igual a 200 e 500 kPa, respectivamente. Ambos os modelos de células de tensão total possuem 30 mm de diâmetro externo e diafragma com 23 mm de diâmetro.

A nomenclatura adotada para as células de tensão total objetivou a rápida identificação da posição das mesmas no interior da câmara de ensaio. As células centrais receberam a identificação “Central / XX – σ_i ”, onde XX representa a profundidade onde foram instaladas, em milímetros, e i indica qual a direção das tensões que estão sendo mensuradas (vertical – v, ou horizontal – h). As demais células de tensão total foram nomeadas segundo a distância da parede lateral mais próxima (100 ou 20), expressa em milímetros, juntamente com a sua localização em relação à posição dos corpos de prova

(“CP” para aquelas localizadas ao longo do eixo dos corpos de prova e “livre” para aquelas alinhadas perpendicularmente a esse eixo). Apesar de esta nomenclatura ter sido utilizada, salienta-se que o corpo de prova de geossintético não foi empregado neste procedimento, uma vez que seu objetivo foi avaliar a distribuição de tensões totais no interior da câmara de ensaio sem a interferência do mesmo. O registro das leituras apontadas pelas células de tensão total foi realizado por meio de dois aparelhos de aquisição de dados, Model P3 Strain Indicator and Recorder, produzidos por Micro-Measurements Strain Gages and Instrumentation, Inc., do Vishay Precision Group, Inc. Estes equipamentos são idênticos àqueles descrito no item 3.3.6.

Figura 3.18 – Localização das células de tensão total empregadas na verificação das tensões normais no interior da câmara de ensaio sem a utilização do corpo de prova: a) 12 mm de profundidade; b) 88 mm de profundidade; c) Vista lateral.

Após o preenchimento da câmara de ensaio com a instalação das células de tensão total, a pressão de ar no interior da bolsa inflável foi aumentada em estágios, simultaneamente ao registro das leituras das células. Este procedimento permitiu relacionar os valores de pressão apontados pelo manômetro do painel de pressão com as leituras de tensão total das células. As constantes de calibração das células foram empregadas para calcular as tensões totais mensuradas pelos equipamentos no interior da câmara de ensaios e, assim, estabelecer a relação entre a pressão aplicada na bolsa de ar pressurizado e as tensões totais nos diversos pontos localizados no interior da câmara de ensaios. Salienta-se que este procedimento foi repetido duas vezes. A Figura 3.19 exemplifica a obtenção da relação entre a pressão aplicada na bolsa de ar e as tensões totais no interior da câmara de ensaio.

Figura 3.19 – Verificação das tensões totais no interior da câmara de ensaios, célula 100-CP: a) Exemplo da variação das leituras; b) Exemplo da relação entre pressão aplicada na bolsa de ar e as tensões mensuradas.

Vale ressaltar que as análises foram realizadas levando em consideração as leituras obtidas em estágios onde houve aumento no valor da pressão aplicada na bolsa de ar. Essa medida foi tomada devido à similaridade em relação ao procedimento de montagem do ensaio, onde a pressão na bolsa de ar é aumentada para a aplicação da tensão normal. O procedimento de montagem referido acima será descrito detalhadamente no item 3.4.

A relação entre a pressão aplicada na bolsa de ar e as tensões totais medidas pelas células de tensão total mostraram-se lineares. Assim, os coeficientes angulares calculados pela regressão linear dos pontos obtidos neste procedimento de calibração representam esta relação e são apresentados na Tabela 3.1. Os valores obtidos no Teste 1 são, na maioria dos casos, maiores que aqueles obtidos nos testes subsequentes. Este comportamento é esperado, uma vez que, após o Teste 1, houve uma densificação da areia utilizada como meio confinante. Assim, nos testes subsequentes, as tensões totais que atingem os pontos onde as células estão localizadas são menores.

Tabela 3.1 – Coeficientes angulares obtidos na regressão linear das leituras das células de tensão total (montagem sem corpo de prova).

Profundidade	Identificação	Coeficiente angular ¹		
		Teste 1	Teste 2	Teste 3
12 mm	Central / 12 - σ_v	1,267 (0,997)	1,225 (0,998)	1,203 (0,992)
	Central / 12 - σ_h	0,546 (0,954)	0,488 (0,995)	0,474 (0,987)
	100-CP	1,032 (0,998)	0,982 (0,999)	0,969 (0,993)
	20-CP	0,956 (0,992)	0,961 (0,998)	0,961 (0,994)
	100-livre	1,591 (0,998)	1,496 (0,999)	1,461 (0,9949)
	20-livre	0,884 (0,998)	0,912 (0,999)	0,898 (0,995)
88 mm	Central / 88 - σ_v	1,375 (0,995)	1,325 (0,996)	1,312 (0,991)
	Central / 88 - σ_h	0,452 (0,989)	0,419 (0,994)	0,406 (0,975)

¹O valor entre parênteses é o coeficiente de determinação obtido na regressão linear dos dados.

As tensões verticais totais medidas no mesmo nível (12 mm de profundidade) não foram iguais entre si. Esse comportamento pode ser explicado pelo formato que a bolsa de ar pressurizado adquire quando a pressão de ar é aplicada em seu interior, apresentando deformações verticais maiores na sua porção central. Adicionalmente, o atrito entre o meio confinante e as paredes laterais da câmara de ensaio podem provocar a redução das tensões verticais nas regiões periféricas da mesma. Em vista disso, elaborou-se uma previsão da distribuição das tensões totais verticais no interior da câmara de ensaios, a 12 mm de profundidade em função da pressão aplicada na bolsa de ar. Essa distribuição é ilustrada na Figura 3.20 e foi obtida a partir dos valores registrados nas células posicionadas neste nível. Salienta-se, contudo, que o coeficiente angular obtido a partir das leituras da célula 100-livre não foi considerado devido à discrepância em relação aos demais valores encontrados.

A distribuição das tensões totais verticais foi elaborada com o programa computacional *Surfer Version 8.00*, fabricado pela Golden Software, Inc. Este recurso permitiu o cálculo do coeficiente angular médio considerando-se toda a câmara de ensaio igual a 0,9884. Assim, pode-se perceber que o sistema de reprodução do confinamento dos corpos de prova desempenhou sua função satisfatoriamente, submetendo o meio confinante a uma tensão vertical média aproximadamente igual àquela aplicada no interior da bolsa de ar e mensurada com o manômetro do painel de pressão.

Figura 3.20 – Distribuição das tensões totais verticais no interior da câmara de ensaio a 12 mm de profundidade (coeficientes angulares das retas de ajuste por regressão linear).

Apesar de este desempenho ter sido considerado satisfatório, é necessário salientar que o coeficiente angular médio calculado com os valores no interior da projeção da faixa de interesse dos corpos de prova, mostrada na Figura 3.20, é igual a 1,1237. Isso significa que a região onde o alongamento do corpo de prova é mensurado seria submetida a uma tensão vertical 12,37% maior que a pressão de ar medida pelo manômetro do painel de pressão. Contudo, constatou-se uma diferença expressiva entre os coeficientes angulares obtidos no centro da câmara de ensaios, em profundidades diferentes (1,267 a 12 mm de profundidade e 1,375 a 88 mm de profundidade). Adicionalmente, a presença do corpo de prova numa montagem real de ensaio poderia causar uma influência que não foi avaliada neste procedimento. Assim, surgiu a necessidade de realizar um novo procedimento de verificação do sistema para reprodução do confinamento, a partir da montagem de um ensaio completo com a instalação das células de tensão total no interior da câmara de ensaios.

3.3.2.1.2. Tensões verticais totais no interior da câmara de ensaios em montagem completa (areia e corpo de prova)

O segundo procedimento de verificação do sistema para reprodução do confinamento iniciou-se com a montagem de um ensaio no novo equipamento, de acordo com os procedimentos a serem apresentados no item 3.4. Dois conjuntos de células de tensão total foram posicionados durante o preenchimento da câmara de ensaios com o meio confinante

(areia). Foi utilizado o mesmo número de células empregado no primeiro procedimento de verificação, conduzido sem o posicionamento do corpo de prova e demais elementos necessários à realização dos ensaios no novo equipamento. Contudo, elas foram divididas de maneira diferente, posicionando-se quatro delas abaixo do corpo de prova e quatro acima. Adicionalmente, as profundidades de instalação das células também foram alteradas, dispondo as mais próximas ao corpo de prova (24 e 68 mm). A localização de ambos os conjuntos é apresentada na Figura 3.21. Salienta-se que foram utilizados os mesmos equipamentos e a mesma nomenclatura das células de tensão total empregados no primeiro procedimento de calibração.

Figura 3.21 – Localização das células de tensão total empregadas na verificação das tensões normais no interior da câmara de ensaio com a utilização do corpo de prova: a) 24 mm de profundidade; b) 68 mm de profundidade; c) Vista lateral.

Similarmente ao processo de calibração sem a utilização do corpo de prova, foram aplicados estágios de pressão no interior da câmara de ensaios através da bolsa de ar inflável e registradas as tensões totais medidas pelas células. Novamente, este procedimento foi realizado três vezes, mas apenas os valores obtidos na primeira delas e com estágios crescentes de pressão na bolsa de ar foram usados para calcular os coeficientes angulares das regressões lineares dos dados. A Tabela 3.2 apresenta todos os coeficientes angulares obtidos neste processo. Estes valores foram empregados para a construção da Figura 3.22, que ilustra a distribuição das tensões totais verticais nos dois níveis onde as células foram posicionadas.

Tabela 3.2 – Coeficientes angulares obtidos na regressão linear das leituras das células de tensão total (montagem com corpo de prova).

Profundidade	Identificação	Coeficiente angular ¹		
		Teste 1	Teste 2	Teste 3
24 mm	Central / 24 - σ_v	1,430 (0,993)	1,399 (0,990)	1,408 (0,991)
	Central / 24 - σ_h	0,592 (0,970)	0,558 (0,991)	0,564 (0,988)
	50-CP	1,373 (0,997)	1,272 (0,996)	1,288 (0,996)
	50-livre	1,514 (0,997)	1,380 (0,991)	1,394 (0,993)
	Central / 68 - σ_v	1,234 (0,981)	1,214 (0,997)	1,222 (0,999)
68 mm	50-CP	1,177 (0,996)	0,902 (0,998)	0,937 (0,998)
	50-livre	1,204 (0,997)	1,241 (0,987)	1,222 (0,999)
	120-CP	2,021 (0,994)	2,151 (0,985)	2,184 (0,982)

¹O valor entre parênteses é o coeficiente de determinação obtido na regressão linear dos dados.

Figura 3.22 – Distribuição das tensões totais verticais no interior da câmara de ensaio na montagem com corpo de prova: a) 24 mm de profundidade; b) 68 mm de profundidade.

As leituras obtidas com a célula 120-CP foram descartadas devido a sua discrepância em relação às demais. Verificou-se uma alteração na resposta do sistema devido à presença do corpo de prova. A partir dos dados obtidos, pôde-se identificar que o coeficiente angular médio no interior da câmara de ensaios foi igual a 1,4415 acima do corpo de prova e 1,1969 abaixo do mesmo. Estes valores são incoerentes com a pressão aplicada na bolsa de ar inflável, uma vez que a média dos coeficientes angulares distribuídos em toda a câmara de ensaio são maiores que a unidade. O comportamento esperado para este tipo de aplicação de tensões verticais consiste numa concentração de tensões nas superfícies menos deformáveis posicionadas no interior da câmara de ensaio (geomembranas). Adicionalmente, são esperadas tensões mais elevadas na região central da bolsa de ar inflável, como ilustrado anteriormente no item 3.3.2.1.1. Assim, optou-se por empregar valores nominais de tensão normal aplicada aos corpos de prova ensaiados no novo equipamento. Estes valores foram considerados iguais àqueles registrados no manômetro do painel de pressão utilizado no controle do fluxo de ar lançado no interior da bolsa de ar inflável. Recomenda-se, ainda, que este procedimento seja repetido em pesquisas futuras de forma a comprovar os resultados obtidos neste estudo.

3.3.2.1.3. Tensões horizontais totais e coeficiente de empuxo no repouso

Os procedimentos de calibração descritos nos itens 3.3.2.1.1 e 3.3.2.1.2 empregaram células de tensão total posicionadas de forma a registrarem as tensões horizontais no interior da câmara de ensaios. Uma vez que o meio confinante foi empregado seco, as tensões totais se igualam as tensões efetivas e, assim, o coeficiente de empuxo no repouso da areia utilizada como meio confinante pôde ser calculado. Salienta-se que este parâmetro foi determinado em três situações: montagem sem corpo de prova a 12 mm de profundidade, montagem sem corpo de prova a 88 mm de profundidade e montagem com corpo de prova a 24 mm de profundidade. O coeficiente de empuxo no repouso calculado nestas três situações foi igual a 0,43, 0,33 e 0,41, respectivamente. Vale ressaltar que o valor determinado a 88 mm de profundidade na montagem sem corpo de prova deve apresentar maior imprecisão devido à sua distância em relação à bolsa de ar. Assim, optou-se por adotar a média (0,42) dos outros dois valores para definir este parâmetro para a areia utilizada como meio confinante nesta pesquisa.

3.3.2.1.4. Estabilidade do sistema de reprodução do confinamento

Ao término do primeiro processo para verificação do sistema de reprodução do confinamento (montagem sem corpo de prova), um último teste foi realizado com monitoramento das tensões totais medidas pelas células de tensão total em longo prazo. Esse teste visou verificar a estabilidade do sistema no tocante à manutenção da pressão no interior da bolsa de ar e das tensões totais no interior da câmara de ensaio. Assim, um valor constante no manômetro do painel de pressão igual a 49,03 kPa (0,5 kgf/cm²) foi mantido por cerca de 68 horas, enquanto o registro das leituras das células de tensão total foi realizado. Em seguida, as constantes de calibração de cada célula foram usadas para calcular a tensão total correspondente.

A Figura 3.23 exemplifica a variação das tensões totais obtida neste procedimento através do registro de uma das células utilizadas (100-CP) na montagem sem o corpo de prova. A Tabela 3.3 resume os resultados do teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento. Salienta-se que os valores esperados apresentados na Tabela 3.3 foram calculados a partir da calibração obtida no teste 3 da montagem sem corpo de prova (Tabela 3.1). Adicionalmente, os coeficientes de variação mostrados na Tabela 3.3 foram determinados considerando-se todas as leituras adquiridas durante o período de manutenção da pressão de ar no interior da bolsa inflável.

Figura 3.23 – Exemplo da variação das leituras das células de tensão total obtida no teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento.

Tabela 3.3 – Resultados do teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento (montagem sem corpo de prova).

Célula de tensão total	Valor esperado (kPa)	Valor médio (kPa)	Coefficiente de variação (%)
Central / 12 - σ_v	58,98	60,16	6,98
Central / 12 - σ_h	23,24	25,88	8,35
100-CP	47,51	48,84	6,60
20-CP	47,12	44,65	7,08
100-livre	71,63	72,89	6,58
20-livre	44,03	44,06	6,46
Central / 88 - σ_v	64,33	64,79	7,81
Central / 88 - σ_h	19,91	23,08	5,57

Percebe-se que as tensões totais registradas pela célula 100-CP apresentaram uma variação em torno de um valor médio, com períodos dos ciclos, em sua maioria, aproximadamente iguais a 110 minutos. Esse comportamento foi verificado em todas as células empregadas nesta verificação. Contudo, os coeficientes de variação (razão entre o desvio padrão e a média aritmética) dos valores de tensão total registrados pelas células apresentaram-se menores que 8,5%, indicando um desempenho satisfatório do sistema de reprodução do confinamento em ensaios de longa duração.

O mesmo procedimento foi repetido após o término da segunda montagem para calibração do sistema de reprodução do confinamento (com corpo de prova). Embora o período dos ciclos de variação das tensões totais tenha sido menor, verificou-se um comportamento similar ao encontrado no primeiro teste de estabilidade deste sistema. Por este motivo, optou-se por finalizar este segundo teste após cerca de 6,5 horas. A Tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos neste segundo teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento, ressaltando-se que os valores esperados foram calculados a partir da calibração obtida no teste 3 da montagem com corpo de prova (Tabela 3.2). Similarmente à

Tabela 3.3, os coeficientes de variação mostrados na Tabela 3.4 foram calculados considerando-se todas as leituras obtidas durante o teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento com a utilização do corpo de prova.

Tabela 3.4 – Resultados do teste de estabilidade do sistema de reprodução do confinamento (montagem com corpo de prova).

Célula de tensão total	Valor esperado (kPa)	Valor médio (kPa)	Coefficiente de variação (%)
Central / 24 - σ_v	69,03	76,53	2,38
Central / 24 - σ_h	27,65	33,82	3,87
50-CP	63,15	68,67	2,57
50-livre	68,35	76,18	2,63
Central / 68 - σ_v	59,91	64,20	4,60
50-CP	45,94	53,07	3,78
50-livre	59,91	64,51	4,38
120-CP	107,08	123,00	5,75

Apesar da diferença entre os valores esperados das células de tensão total e aqueles calculados a partir da média aritmética das leituras registradas, verificaram-se coeficientes de variação das leituras ainda menores que aqueles obtidos na montagem sem o corpo de prova. Este aspecto contribui para avaliar o desempenho do sistema de reprodução do confinamento como satisfatório.

3.3.3. Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento do novo equipamento de fluência foi dimensionado para elevar e manter a temperatura de ensaio acima da temperatura ambiente. Esse sistema é composto por três resistências elétricas, cada uma com potência igual a 1.500 W, adquiridas de INTI Equipamentos Termoelétricos Ltda., dois termopares do tipo J, um controlador com interface computacional e uma cobertura em poliestireno expandido. Os termopares e o controlador de temperatura foram fornecidos por Flyever Equipamentos LTDA.

Como pôde ser visto na Figura 3.13, parte do sistema de aquecimento foi instalada no compartimento inferior da câmara de ensaio. Nela encontram-se as resistências elétricas e um dos termopares (TP-1). O espaço vazio entre as paredes do compartimento inferior e as resistências elétricas foi preenchido com areia fofa lançada manualmente sem compactação, de forma a produzir uma continuidade maior na propagação de calor. Testes realizados durante a montagem do equipamento mostraram que a variação em torno da temperatura

programada é menor quando o compartimento inferior é preenchido com areia. A Figura 3.24 ilustra o preenchimento do compartimento inferior com areia e a localização do termopar 1 (TP-1), posicionado a 10 mm da resistência elétrica central. Por fim, o compartimento inferior é fechado com uma tampa, que serve como fundo do compartimento superior. Inversamente ao TP-1, o segundo termopar (TP-2) é inserido na porção superior da câmara durante a montagem de cada ensaio, 20 mm acima do corpo de prova de geossintético.

Figura 3.24 – Preenchimento do compartimento inferior com areia e localização do termopar 1 (TP-1).

Cada termopar é utilizado para um propósito diferente. O termopar 1 (TP-1) controla a temperatura nas proximidades das resistências elétricas e é usado para ativá-las quando a temperatura registrada é menor que a temperatura programada no controlador. Assim, o termopar 1 é considerado ativo e controla a temperatura do compartimento inferior da câmara de ensaio. O termopar 2, por sua vez, é passivo, pois é utilizado apenas para registrar a temperatura nas proximidades dos corpos de prova durante os ensaios no novo equipamento. Assim, a temperatura de ensaio é considerada igual àquela registrada pelo termopar 2.

Testes preliminares indicaram a necessidade de programar temperaturas mais elevadas no compartimento inferior da câmara de ensaio (TP-1) para atingir as temperaturas desejadas nas proximidades dos corpos de prova (TP-2). Este comportamento é esperado, uma vez que a execução de ensaios de fluência em temperaturas elevadas induz a ocorrência de perdas de energia térmica para o ambiente ao longo dos mesmos. Duas medidas foram tomadas para mitigar esse empecilho. Primeiramente, o procedimento para ensaios aquecidos realizados no novo equipamento prevê a utilização de uma cobertura em poliestireno

expandido para a câmara de ensaio, com o propósito de reduzir as perdas de energia térmica. Em segundo lugar, um processo de calibração foi realizado para verificar a diferença entre as temperaturas medidas pelos dois termopares. Assim, identificou-se a temperatura nas proximidades do corpo de prova para uma dada temperatura programada no compartimento inferior da câmara de ensaio.

O procedimento de calibração das leituras dos termopares foi realizado para dois geossintéticos utilizados nesta pesquisa, um geotêxtil não tecido e uma geogrelha, ambos manufaturados com poliéster. Estes testes seguiram uma mesma metodologia. Primeiramente, procedeu-se o preenchimento do compartimento superior da câmara de ensaio com o meio confinante (areia) e o posicionamento do corpo de prova de geossintético. Em seguida, posicionaram-se o termopar 2 e a bolsa de ar pressurizado. Finalmente realizou-se o fechamento do compartimento superior da câmara de ensaio e a colocação da cobertura em poliestireno expandido. Assim, foram simuladas execuções reais de ensaios conduzidos em temperatura elevada com o novo equipamento. Após a preparação dos testes, a temperatura programada para o termopar 1 foi estabelecida e mantida constante até a obtenção de leituras constantes no termopar 2. Esse primeiro estágio levou cerca de 20 horas nos testes com os dois materiais. Em seguida, um acréscimo máximo de 15°C foi programado para o termopar 1, esperando-se novamente a constância nas leituras do termopar 2. Esse procedimento foi repetido até a obtenção de uma temperatura igual ou maior que 80°C no termopar 2 e é ilustrado na Figura 3.25 a partir dos resultados obtidos usando a geogrelha de poliéster.

Figura 3.25 – Variação de temperatura nos termopares 1 e 2 durante calibração (a) e curva de calibração típica do sistema de aquecimento (b) obtidas a partir dos testes realizados com a geogrelha de poliéster.

Percebe-se claramente na Figura 3.25a que a temperatura do termopar 1 varia consideravelmente em torno do valor programado. Este comportamento também foi percebido

durante os ensaios. Contudo, verificou-se que a temperatura no termopar 2, próximo ao corpo de prova, tem uma variação pequena. O coeficiente de variação das leituras de temperatura registradas pelo termopar 2 é menor que 1,30% em todos os ensaios realizados com o novo equipamento. Portanto, a temperatura nas proximidades dos corpos de prova é apropriadamente estável durante os ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento. Não foi verificada nenhuma relação entre os coeficientes de variação de temperatura e alguma característica do ensaio (confinado ou não, tipo de geossintético, solo etc.).

O procedimento de calibração da temperatura foi repetido empregando-se corpos de prova da geogrelha em isolamento. Assim, esse material foi testado novamente em uma montagem semelhante, porém sem a utilização do meio confinante. Após o fechamento da câmara de ensaio, o acréscimo da temperatura em estágios foi iniciado e as leituras do termopar 2 foram acompanhadas. A calibração da temperatura com corpos de prova em isolamento foi realizada duas vezes, com corpos de prova diferentes. A primeira delas foi conduzida com a climatização do laboratório acionada, enquanto a segunda foi executada sem climatização no local. Portanto, o procedimento de calibração da temperatura foi conduzido em quatro condições distintas, explicitadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características dos testes realizados para a calibração da temperatura.

Teste	Geossintético	Meio confinante	N	ΔT	Variação de temperatura no TP-1	Equação de calibração
A	Geotêxtil não tecido	Areia	18	5°C	25 a 110°C	$y = 0,710x + 4,837$
B1	Geogrelha	Areia	5	15°C	45 a 105°C	$y = 0,724x + 4,448$
B2	Geogrelha	Nenhum (climatizado)	6	15°C	35 a 110°C	$y = 0,716x + 4,516$
B3	Geogrelha	Nenhum (não climatizado)	6	10 e 15°C	35 a 105°C	$y = 0,716x + 5,608$

Nota: N é o número de estágios; ΔT é o incremento de temperatura entre estágios.

Conforme apontado na Tabela 3.5, as equações de calibração obtidas são bastante próximas entre si. Por este motivo, optou-se por utilizar a média dos coeficientes angulares e lineares para obter uma equação média ($y = 0,716x + 4,852$) entre os resultados como referência inicial para determinar a temperatura a ser programada no termopar 1, próximo às resistências elétricas. Salienta-se que a variável independente na equação média, x , é a temperatura programada no termopar 1 e a variável dependente, y , é a leitura obtida no

termopar 2. Adicionalmente, verificaram-se coeficientes de determinação das equações de calibração bastante satisfatórios, com o mínimo igual a 0,999.

3.3.3.1. Verificação da temperatura ambiente

As normas vigentes para realização de ensaios de fluência em geossintéticos prescrevem que a temperatura do ensaio seja mantida constante, estabelecendo uma variação máxima de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (e.g. ASTM D 5262). Apesar do uso de uma sala climatizada por um aparelho de ar condicionado, optou-se por verificar a temperatura ambiente do laboratório onde o novo equipamento de fluência foi montado e os ensaios conduzidos. Essa verificação foi realizada duas vezes, em momentos distintos: início dos primeiros ensaios-teste (julho/2009) e término da primeira série de ensaios válidos (março/2010). A temperatura ambiente foi mensurada com o termopar 2, instalado temporariamente no exterior da câmara de ensaio.

A primeira verificação da temperatura ambiente do laboratório foi conduzida por cerca de 54 horas, sem a utilização do aparelho de ar condicionado do laboratório de forma a simular uma pane no mesmo. A temperatura média obtida foi de $20,9^{\circ}\text{C}$, com valores máximo e mínimo iguais a $21,4$ e $19,6^{\circ}\text{C}$, respectivamente. O coeficiente de variação das leituras tomadas neste procedimento foi igual a 1,78%. A segunda verificação durou aproximadamente 23 horas e apontou valores de temperatura média, máxima e mínima iguais a $21,7$, $22,0$ e $20,8^{\circ}\text{C}$, respectivamente, e coeficiente de variação igual a 0,99%. Assim, considera-se o local de instalação do novo equipamento adequado para sua utilização.

3.3.4. Sistema de aplicação da solicitação de tração

O sistema de aplicação da solicitação de tração do novo equipamento de fluência foi dimensionado para ser capaz de aplicar um esforço de tração constante no corpo de prova de geossintético. Adicionalmente, objetiva-se um incremento suave do carregamento até atingir o nível de solicitação desejado. Assim, vários elementos formam este sistema, como será descrito a seguir.

A fixação do corpo de prova é feita em garras do tipo rolete apoiadas sobre duas guias lineares (300 mm de comprimento) com gaiola de esferas®, produzidas pela THK CO.,

LTD. Além de permitir um carregamento horizontal, este sistema é caracterizado, segundo o fabricante, por ser de movimento suave, longa vida útil e baixos níveis de atrito e de ruído em comparação com guias lineares convencionais. Um conjunto com duas guias lineares está posicionado em cada extremidade do novo equipamento. As guias de cada conjunto distam 270 mm entre si e permitem um curso de aproximadamente 120 mm em cada garra. Estas são conectadas a pesos livres por meio de cabos de aço com diâmetro nominal igual a 3,2 mm e capacidade nominal de 4,45 kN (1.000 lbf).

Apesar da estabilidade do carregamento, a dificuldade de aplicação de cargas elevadas é considerada como a principal desvantagem da utilização de pesos livres. Com o propósito de contornar esse aspecto, projetou-se um conjunto de polias com a função de multiplicar o carregamento aplicado em um fator aproximadamente igual a 5,75. Adicionalmente, células de carga instaladas entre as garras e o conjunto de polias permitem precisar a solicitação a que o corpo de prova estará submetido durante os ensaios de fluência. Foram utilizadas duas células de carga modelo CSL/ZL-500, manufaturadas pela MK Controle e Instrumentação LTDA., com capacidade nominal de aproximadamente 4,90 kN (500 kgf), alimentação 10 VCC, sinal de saída de $2 \text{ mV/V} \pm 10\%$ e que trabalham em tração ou compressão. A Figura 3.26 mostra o conjunto descrito acima (garra, guias lineares, célula de carga, cabo de aço e conjunto de polias) de uma das extremidades do novo equipamento, com destaque para os elementos posicionados em sua parte superior.

Figura 3.26 – Componentes do equipamento, com destaque para aqueles posicionados em sua parte superior.

As duas células de carga utilizadas no novo equipamento foram calibradas para verificar a constante de calibração fornecida pelo fabricante. Foi utilizada uma terceira célula de carga, aferida, com capacidade nominal de 19,61 kN (2.000 kgf), montada em uma máquina de ensaios fabricada por EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaios Ltda., modelo DL 3000, com 29,42 kN (3.000 kgf) de capacidade nominal em ambos os sentidos (tração ou compressão). Assim, pôde-se ter o par de valores de força aplicada (a partir da célula de carga aferida) *versus* leitura obtida na célula de carga em aferição.

Devido ao uso do conjunto de polias, um segundo procedimento de calibração foi realizado para determinar qual carregamento seria aplicado ao corpo de prova com uma determinada quantidade de pesos livres. Assim, a partir de uma montagem de ensaio padrão no novo equipamento, o carregamento por pesos livres foi incrementado em estágios enquanto as leituras, em kN, das células de carga foram registradas. Salienta-se que cada célula de carga foi calibrada individualmente. A Figura 3.27 apresenta as curvas de calibração obtidas nestes dois procedimentos. Devido à similaridade dos resultados, uma das retas de calibração apresentadas na Figura 3.27a foi transladada no eixo das abscissas para facilitar sua visualização. Optou-se por manter o eixo das abscissas em uma unidade (kgf) diferente daquela do eixo das ordenadas (kN) na Figura 3.27b, pois os pesos livres utilizados nesse estudo apresentam inscrições nessa unidade de força.

Figura 3.27 – Curvas de calibração das células de carga isoladas (a) e acopladas ao novo equipamento (b).

Como pode ser observado na Figura 3.27b, as respostas das células de carga acopladas ao equipamento de fluência são muito semelhantes. Como medida de padronização do ensaio, optou-se, por utilizar a média dos coeficientes angulares e lineares para obtenção de uma equação média ($y = 0,0565x + 0,1510$) entre as respostas de cada célula de carga, onde a variável independente (x) é o peso aplicado e a variável dependente (y) é a leitura

registrada nas células de cargas. Isto resulta numa diferença máxima de $\pm 3,3\%$ entre o valor medido pelas células de carga e o valor determinado pela equação média. Apesar da pequena diferença, o carregamento em cada extremidade do corpo de prova é corrigido imediatamente após a sua aplicação e ao longo de todo o ensaio por meio da introdução de pequenos elementos metálicos sobre o total de pesos livres. Portanto, a equação de calibração é utilizada como estimativa inicial da quantidade de pesos livres a ser utilizada e, imediatamente após a aplicação do carregamento, iniciam-se pequenas correções a partir da adição de elementos metálicos de forma a manter o carregamento constante e igual nas duas extremidades durante o ensaio.

A aplicação do carregamento, propriamente dita, é realizada por meio da liberação da pressão em dois macacos hidráulicos onde os pesos livres estão apoiados antes do início dos ensaios. Foram empregados equipamentos com capacidade nominal de 98,1 kN (10 tf), que foram escolhidos devido à necessidade de um curso maior dos pistões. Os macacos escolhidos possuem curso máximo de 150 mm.

3.3.5. Sistema para medição do alongamento do corpo de prova

O alongamento dos corpos de prova durante os ensaios de fluência realizados com o novo equipamento é calculado a partir de leituras do deslocamento de dois pontos conhecidos, como apresentado pela Equação 10. Esses pontos referem-se aos locais de fixação de dois fios inextensíveis na faixa de interesse do corpo de prova, descritos no item 3.3.1. Foram utilizados cabos de aço para pesca produzidos por Marine Sports do Brasil Ltda., em aço inoxidável, cobertos com uma película de náilon (*nylon coated wire stainless*) e com capacidade nominal de aproximadamente 22,24 N (5 lbf).

$$\varepsilon = \frac{d_A + d_B}{\ell_i} \quad \text{Equação 10}$$

onde ε é a deformação do corpo de prova, em %; d_A e d_B são as leituras de deslocamento de cada transdutor de deslocamento, em milímetros; ℓ_i é a distância inicial entre os pontos de fixação dos fios inextensíveis, em milímetros.

Os fios inextensíveis são conectados a elementos metálicos, com massa aproximadamente igual a 1,75 kg, através de amarração e colagem, realizada com o adesivo bicomponente usado para a fixação dos mesmos nas faixas de interesse dos corpos de prova. Os elementos metálicos ligados aos fios inextensíveis são colocados em contato com as hastes

de dois transdutores de deslocamento durante a montagem dos ensaios. Foram utilizados transdutores com curso máximo de 100 mm fabricados por Kyowa Electronic Instruments CO., LTD., modelo DTH-A-100. Assim, à medida que as deformações do corpo de prova ocorrem, os elementos metálicos se deslocam, provocando a variação nas leituras dos transdutores de deslocamento, com precisão de 0,01 mm. O posicionamento desses elementos pôde ser visto na Figura 3.26.

Apesar da confiabilidade dos transdutores de deslocamento empregados nesta pesquisa (TD-1 e TD-2), procedeu-se uma nova calibração dos mesmos. Para tal, foi utilizado um relógio comparador aferido e diversos elementos metálicos com espessuras diferentes. A Figura 3.28 ilustra a montagem utilizada neste procedimento. A haste de cada transdutor foi submetida a diversos deslocamentos crescentes, resultando em variações nas leituras dos mesmos. Essas leituras foram registradas juntamente com o respectivo valor apontado pelo relógio comparador. Dessa forma, obtiveram-se as constantes de calibração dos aparelhos. Salienta-se que, devido à proximidade entre os valores encontrados, a reta correspondente ao TD-2 foi transladada no eixo das abscissas para facilitar a sua visualização na Figura 3.28b.

Figura 3.28 – Calibração dos transdutores de deslocamento: a) Montagem utilizada; b) Resultado da calibração.

A utilização de fios inextensíveis para leitura dos deslocamentos dos pontos conhecidos na faixa de interesse dos corpos de prova requer que os mesmos apresentem deformações insignificantes em relação às deformações do corpo de prova, principalmente em temperaturas elevadas. Assim, uma montagem especial foi conduzida com o intuito de verificar a magnitude das deformações dos fios inextensíveis devido ao carregamento realizado pelos elementos metálicos. Nela, uma amostra do fio inextensível foi colocada de uma extremidade a outra do equipamento de ensaio, passando pelo interior da câmara de ensaios. Foram fixados os elementos metálicos através da amarração e colagem, como

descrito anteriormente. Por fim, os elementos metálicos foram postos em contato com as hastes dos transdutores de deslocamento. A câmara de ensaio foi então fechada e sua temperatura interna elevada e mantida constante em cerca de 80°C enquanto as leituras dos transdutores registram o alongamento do fio inextensível. A Figura 3.29 ilustra a câmara de ensaio antes do seu fechamento na montagem utilizada para verificação dos fios inextensíveis.

Figura 3.29 – Câmara de ensaio antes do fechamento em montagem para verificação dos fios inextensíveis.

A temperatura de verificação dos fios inextensíveis foi mantida entre 80,1 e 82,9°C, com média igual a 81,9°C (COV = 1.11%), durante aproximadamente 33 horas. Essa temperatura é maior que qualquer outra utilizada nos ensaios de fluência com o novo equipamento. Ainda assim, o deslocamento dos elementos metálicos devido à deformação do fio inextensível foi mínimo em relação à magnitude das deformações dos geossintéticos. A Figura 3.30 ilustra a variação nas leituras dos transdutores de deslocamento e da temperatura ao longo desta verificação.

Figura 3.30 – Deslocamento dos elementos metálicos e temperatura no interior da câmara de ensaio durante a verificação dos fios inextensíveis.

O deslocamento inicial dos elementos metálicos pode ser atribuído ao aumento da temperatura no interior da câmara de ensaio. Após a estabilização da temperatura, o fio inextensível não sofreu nenhum alongamento adicional significativo, atingindo um patamar praticamente constante. Nesse patamar, os registros variaram dentro da precisão de leitura dos transdutores (0,01 mm). Com base nesse teste, verificou-se a importância de atingir a temperatura de ensaio desejada antes de iniciar a aplicação do carregamento do corpo de prova. Esse procedimento foi adotado como padrão em todos os ensaios.

3.3.6. Sistema de aquisição dos dados

Procedeu-se a aquisição contínua de dados ao longo dos ensaios realizados com o novo equipamento de fluência. Conforme apresentado em itens anteriores, as leituras registradas são provenientes de três instrumentos diferentes: células de carga, transdutores de deslocamento e termopares. As células de carga foram usadas para registrar a solicitação de tração em cada extremidade dos corpos de prova (item 3.3.4). O deslocamento dos pontos de fixação dos fios inextensíveis na faixa de interesse dos corpos de prova foi tomado por transdutores de deslocamento (item 3.3.5) e a temperatura de ensaio foi registrada a partir de termopares (item 3.3.3) inseridos na câmara de ensaio.

Dois sistemas diferentes foram utilizados para a aquisição e o registro dos dados provenientes dos instrumentos presentes no novo equipamento de fluência. Primeiramente, as leituras dos transdutores de deslocamento e das células de carga foram adquiridas e registradas com Model P3 Strain Indicator and Recorder, produzido por Micro-Measurements Strain Gages and Instrumentation, Inc., do Vishay Precision Group, Inc. Este aparelho possui quatro canais de entrada, permite tensões de saída de zero a 2,5 V, em corrente alternada, e funciona tanto por bateria interna como por alimentação externa. A aquisição e registro das leituras dos termopares, por sua vez, foram realizados por um controlador de temperatura, modelo FE50RPN, manufaturado por Flyever Equipamentos LTDA., o mesmo fornecedor dos termopares. Salienta-se que esses dois sistemas possuem interfaces computacionais que permitem a sua operação. A Figura 3.31 ilustra os aparelhos utilizados pelo sistema de aquisição e transmissão de dados.

Figura 3.31 – Aparelhos utilizados no sistema de aquisição dos dados: a) Leituras de deslocamento e das células de carga (Model P3 Strain Indicator and Recorder); b) Controlador de temperatura.

3.4. Montagem do ensaio

O equipamento desenvolvido nesta pesquisa permite a realização de ensaios de fluência em geossintéticos em diferentes condições (em meio confinante ou não e sob temperatura elevada ou não). Contudo, a montagem dos ensaios apresenta uma mesma sequência, diferindo apenas quanto à reprodução do meio e das tensões confinantes e à elevação na temperatura de ensaio. Portanto, este item descreve a montagem para realização de um ensaio de fluência confinado e acelerado, por se tratar do caso mais complexo. Para a execução dos demais tipos de ensaios, é necessário apenas que uma determinada etapa não seja realizada, de forma a não reproduzir a referida condição (confinamento com solo e/ou elevação da temperatura de ensaio).

A montagem de um ensaio no equipamento desenvolvido nesta pesquisa tem início com a preparação do corpo de prova. Como apresentado no item 3.3.1, procede-se o reforço de duas regiões, o que resulta numa faixa de interesse dos corpos de prova com largura igual a 200 mm e comprimento igual a 100 mm. Posteriormente, os fios inextensíveis são fixados no geossintético (amarrados e colados). Após a secagem do adesivo, mede-se a distância entre os pontos de fixação destes fios com paquímetro, com precisão de 0,01 mm, e o valor é considerado como a distância inicial entre os pontos de fixação dos fios inextensíveis, apresentada na Equação 10.

3.4.1. Preenchimento da câmara de ensaio

O preenchimento do compartimento superior da câmara de ensaio é o primeiro passo para a execução dos ensaios de fluência no novo equipamento. Salienta-se que o compartimento inferior já está preenchido com areia fofa lançada manualmente, como descrito no item 3.3.3. Assim, não foi necessário remover o fundo do compartimento superior entre os ensaios realizados no novo equipamento. A Figura 3.32 ilustra a sequência realizada para o preenchimento da porção superior da câmara de ensaio, com exceção das etapas já apresentadas na Figura 3.17. Os detalhes para execução das atividades representadas na Figura 3.32 são descritos a seguir.

Figura 3.32 – Sequência de preenchimento da câmara de ensaio com solo e posicionamento do corpo de prova.

Primeiramente, a porção superior da câmara de ensaio deve ser preenchida até o nível inferior da abertura lateral por onde o corpo de prova tem acesso ao seu lado externo (Figura 3.32a). Ressalta-se que esta etapa é conduzida após o fechamento das aberturas laterais com fita adesiva, de forma a evitar perda de material. Separa-se, portanto, a quantidade de solo necessária para o preenchimento até esse nível, subdividindo-a em três porções idênticas. Esta etapa é realizada com o controle da massa de material a ser lançado através de balança eletrônica com precisão de 1,0 g. Em seguida cada porção é lançada e nivelada manualmente.

Após o preenchimento de parte do compartimento superior (até o nível das aberturas laterais), duas geomembranas de polietileno de alta densidade (250 x 150 mm), lisas em uma superfície e texturizadas na outra, são posicionadas sobre o material confinante (Figura 3.32b). A superfície texturizada é posta em contato com o solo e o lado liso é lubrificado com vaselina industrial. O corpo de prova é então posicionado sobre as geomembranas, de forma que a área de interesse permaneça em contato com o solo. Isso é possível devido às dimensões das geomembranas (Figura 3.32c). Acima do corpo de prova, são dispostas duas geomembranas idênticas às anteriores, novamente com o lado texturizado em contato com o solo e o liso e lubrificado em contato com o geossintético (Figura 3.32d). A área de contato entre os corpos de prova e as geomembranas é, portanto, igual a $0,03 \text{ m}^2$ (200 x 150 mm). O objetivo do uso das geomembranas é evitar o contato entre o corpo de prova e o meio confinante nas regiões adjacentes à faixa de interesse e, assim, garantir que a solicitação de tração atinja com valor mais próximo àquele registrado pelas células de carga.

O preenchimento do compartimento superior da câmara de ensaio é finalizado até uma altura suficiente para a colocação do geotêxtil de proteção e da bolsa de ar pressurizado (cerca de 30 mm do topo do compartimento). Este procedimento é conduzido de maneira semelhante à descrita anteriormente para cada material usado como meio confinante. Adicionalmente, o termopar 2 é inserido no meio confinante durante esta etapa (Figura 3.32e). A Figura 3.32f ilustra o aspecto final da câmara de ensaio antes do fechamento da mesma, por meio da fixação da tampa com parafusos, como apresentado na Figura 3.17. É importante ressaltar que os fios inextensíveis devem ser levados ao lado externo da câmara de ensaio durante o seu preenchimento com o meio confinante, através de dois orifícios presentes nas laterais da mesma.

Salienta-se que os métodos de compactação dos meios confinantes diferem entre si devido à própria natureza dos materiais. A areia (solo A) foi lançada seca, de pequena altura (cerca de 20 mm), determinada empiricamente para que este material atingisse densidade relativa igual a 45% ao término do processo. Assim, não foi necessário nenhum método de densificação da areia após o preenchimento da porção superior da câmara de ensaio. Por outro lado, nos casos em que o solo (solo B) foi utilizado como meio confinante, procedeu-se sua compactação manualmente, com soquete de base quadrada com 150 mm de aresta e massa igual a aproximadamente 3,0 kg, de forma a atingir as condições de compactação desejadas ($GC = 92,5\%$ e teor de umidade ótimo). Em ambos os casos, o controle do preenchimento da porção superior da câmara de ensaio se deu por verificação da

altura da camada e da massa de solo lançada.

Quando o solo B é utilizado como meio confinante, a compactação da última camada no interior da câmara de ensaio requer um prolongamento das paredes verticais da mesma, de forma a reter o solo fofo recém-lançado, antes da compactação propriamente dita. A ausência deste prolongamento na parte superior da câmara de ensaio impossibilitou, portanto, a compactação da última subcamada de solo, com 24 mm de espessura. Assim, nos ensaios onde o solo foi utilizado para reproduzir o meio confinante, duas amostras de geocompostos drenantes (geotêxteis não tecidos associados a um geoespaçador) de polietileno de alta densidade são empilhadas acima do solo compactado. Estas amostras possuem dimensões idênticas às dimensões internas da câmara de ensaio (400 x 400 mm). Essa medida teve o propósito de complementar o espaço entre a bolsa de ar pressurizado e o solo compactado.

3.4.2. Fixação do corpo de prova às garras do equipamento

A etapa seguinte ao preenchimento da porção superior da câmara de ensaio e colocação do corpo de prova consiste na fixação deste às garras do equipamento de fluência. Inicialmente aplica-se uma pressão de ar na bolsa menor que a tensão normal desejada para o ensaio, com o propósito de evitar movimentações do corpo de prova em relação ao meio confinante durante esse procedimento. Adotou-se 20 kPa como valor padrão. Em seguida, os corpos de prova são fixados às garras do tipo rolete e estas são travadas para evitar sua movimentação e não submeter o corpo de prova a nenhum carregamento antes do início do ensaio. Ao término desta etapa, a pressão na bolsa de ar é removida por completo e a cobertura em poliestireno expandido é disposta sobre a câmara de ensaio. Neste momento também são posicionados os elementos metálicos sobre os transdutores de deslocamento e iniciados a aquisição e o registro de suas leituras.

3.4.3. Ajuste da temperatura de ensaio

O ajuste da temperatura deve ser realizado em todos os ensaios de fluência em temperaturas elevadas conduzidos com o novo equipamento. O primeiro passo para a conclusão deste procedimento é a definição da temperatura de ensaio desejada, a ser

registrada pelo termopar 2 (TP-2), próximo ao corpo de prova. A partir deste valor e usando a calibração mostrada no item 3.3.3, verifica-se o patamar de temperatura que deve ser atingido pelo termopar 1 (TP-1) no compartimento inferior da câmara de ensaio. Após o início do aquecimento do equipamento, aguarda-se até que TP-2 acuse a temperatura desejada e mantenha-se constante.

Como procedimento padrão em todos os ensaios executados em temperaturas elevadas, evitou-se que o corpo de prova atingisse uma temperatura mais alta que a desejada e depois ser submetido ao carregamento em uma temperatura menor. Assim, uma vez inserida a temperatura a ser atingida no termopar 1, esta não é reprogramada a uma temperatura menor. Essa medida foi tomada em todos os ensaios aquecidos para evitar a degradação térmica do corpo de prova, que seria caracterizada caso o material atingisse uma temperatura elevada por um determinado tempo e fosse submetido ao carregamento numa temperatura menor.

O sistema de aquecimento também foi utilizado nos ensaios realizados em temperatura ambiente. Contudo, a temperatura inserida para ser atingida por TP-1 foi sempre menor que a temperatura ambiente. Dessa forma, as resistências elétricas não são ativadas e as leituras do TP-2 são usadas para acompanhar a temperatura do corpo de prova com maior precisão.

3.4.4. Aplicação do carregamento constante

Após a estabilização das leituras de temperatura próximas ao corpo de prova (TP-2), procede-se a preparação dos pesos livres para a aplicação do carregamento constante do ensaio de fluência. Considerando a resistência à tração do geossintético a ser ensaiado no novo equipamento, define-se a porcentagem deste valor que será aplicada aos corpos de prova durante os ensaios de fluência. Assim, os valores de solicitação de tração aplicados em todos os ensaios de fluência apresentados nesta tese são referidos como uma porcentagem da resistência a tração do geossintético, obtida a partir de ensaios normalizados e apresentada no item 4.1.

A quantidade de pesos livres a ser utilizada é determinada a partir da calibração apresentada no item 3.3.4. Os pesos são montados no equipamento sem danos ao corpo de prova, uma vez que as garras permanecem travadas durante esta fase e os pesos livres são suportados por dois macacos hidráulicos antes do início do ensaio. As leituras dos transdutores de deslocamento são acompanhadas durante toda esta etapa para verificar se o

corpo de prova não sofreu deformações significativas. Ao término desta fase o corpo de prova é submetido à tensão normal desejada através da aplicação de pressão na bolsa de ar.

Antes da aplicação do carregamento, as travas de segurança das garras são removidas com os macacos hidráulicos ainda posicionados. Este procedimento resulta numa pré-carga no geossintético menor que 10% da carga de ensaio. Em seguida, todo o equipamento é verificado em relação à pressão na bolsa de ar, constância da temperatura no termopar 2, quantidade de pesos livres, leituras das células de carga e dos transdutores de deslocamento e estado geral do mesmo. Uma vez que todos os itens estejam de acordo com o planejamento do ensaio, procede-se a aplicação do carregamento do corpo de prova a partir da liberação de pressão do óleo dos macacos hidráulicos. Essa etapa deve ser conduzida por dois operadores simultaneamente, um em cada extremidade do equipamento. Assim, os operadores devem ser treinados para que o carregamento do corpo de prova ocorra igual e suavemente nas duas extremidades. Sugere-se, portanto, que os operadores conduzam a aplicação do carregamento algumas vezes como forma de treinamento antes de fazê-lo em um ensaio válido. Isto pode ser realizado com a mesma montagem, antes de destravar as garras do equipamento.

Salienta-se que as leituras dos transdutores de deslocamento foram registradas constantemente desde o posicionamento do corpo de prova no interior da câmara de ensaio e não apenas após a aplicação do carregamento. Isso permitiu a quantificação de deformações não significativas durante a montagem do ensaio, bem como determinar o momento exato de início do carregamento e da fluência, considerada sempre um minuto após o início da aplicação do carregamento.

3.5. Desmontagem do ensaio

A desmontagem do ensaio possui um caráter importante uma vez que o aspecto final do corpo de prova foi verificado em todos os ensaios. Além disso, alguns corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração após os ensaios de fluência realizados no novo equipamento. Assim, foi elaborado um procedimento para desmontagem dos ensaios. Primeiramente, as garras são travadas de forma que o corpo de prova não sofra qualquer deformação durante a desmontagem. Em seguida, são removidos a pressão na bolsa de ar, a cobertura isolante térmica, o termopar 2, a tampa, a bolsa de ar e o geotêxtil de proteção. A retirada do material lançado acima do corpo de prova é feita cuidadosamente de forma a não

danificá-lo ou alterar sua posição. Mede-se a distância final entre os pontos de fixação dos fios inextensíveis e remove-se o corpo de prova das garras, retirando-o da câmara de ensaio cuidadosamente. Por fim, remove-se o restante do material confinante do compartimento superior da câmara de ensaio e procede-se a limpeza de todos os elementos do novo equipamento. Salienta-se a importância deste procedimento de limpeza, principalmente em relação às guias lineares, uma vez que qualquer interrupção no movimento das garras pode conduzir a ensaios mal interpretados.

4. Materiais e Métodos

Diferentes materiais foram empregados nos ensaios de fluência conduzidos nesta pesquisa. Além disso, tais ensaios reproduziram condições distintas em relação ao confinamento dos corpos de prova e à temperatura de ensaio. Este capítulo apresenta os materiais empregados (geossintéticos e solos) e os ensaios realizados nesta pesquisa.

4.1. Geossintéticos empregados

Os ensaios relatados nesta tese foram conduzidos em cinco tipos diferentes de geossintéticos: duas geogrelhas biaxiais, um geotêxtil tecido e dois geotêxteis não tecidos. As geogrelhas diferem quanto ao tipo de polímero e ao método de fabricação. A geogrelha GG-PP, manufaturada por Tensar Earth Technologies, Inc., é produzida por extrusão de polipropileno (PP), enquanto que a geogrelha GG-PET é composta por núcleos de poliéster (PET) recobertos com policloreto de vinila (PVC), fabricada por meio de solda dos elementos transversais e longitudinais e fornecida por Allonda Geossintéticos Ambientais. O geotêxtil tecido foi nomeado GTW e é manufaturado a partir de laminetes entrelaçados de polipropileno (PP). Esse geossintético foi produzido por Huesker Ltda. Os dois geotêxteis não tecidos são fabricados a partir do processo de agulhamento de fibras de poliéster, porém diferem quanto ao comprimento das mesmas. O geotêxtil GTNcont é produzido a partir de filamentos contínuos e foi fornecido por Mexichem Bidim. O GTNcurto, por sua vez, foi manufaturado com fibras curtas e fornecido por Industria de Feltros Santa Fé.

A caracterização dos geossintéticos submetidos aos ensaios apresentados nesta tese foi realizada a partir dos procedimentos para medição da gramatura (ASTM D 5261) e da espessura nominal (ASTM D 5199) e ensaios de tração (ASTM D 4595 para geotêxteis e ASTM D 6637 para geogrelhas). A Tabela 4.1 apresenta as principais características destes materiais. Os ensaios de tração foram realizados em duas máquinas diferentes, devido à diferença na resistência dos geossintéticos empregados. Assim, os ensaios de tração de ambas as geogrelhas (GG-PP e GG-PET) e do geotêxtil tecido (GTW) foram conduzidos em máquina de ensaios fabricada por Instron Corporation, modelo 3385H, com capacidade de 250 kN, para ensaios de tração e compressão. Este equipamento é provido de vídeo-extensometria, fornecido pela mesma empresa, e célula de carga aferida com igual

capacidade. Adicionalmente, esta máquina de ensaio permite a utilização de carregamentos constantes para a realização de ensaios de fluência.

Tabela 4.1 – Características dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa.

Características	Geossintético				
	GG-PP	GG-PET	GTW	GTNcont	GTNcurto ¹
Descrição do geossintético	Geogrelha biaxial	Geogrelha biaxial	Geotêxtil tecido	Geotêxtil não tecido	Geotêxtil não tecido
Método de fabricação	Extrudada	Soldada	Laminetes entrelaçados	Agulhado; Filamento	Agulhado; Fibras curtas
Tipo de polímero	Polipropileno	Poliéster	Polipropileno	Poliéster	Poliéster
Gramatura (g/m ²)	N/A	N/A	276,0 (3,03%)	253,6 (0,10%)	313,0 (6,80%)
Abertura da malha (mm)	37,0	28,2	N/A	N/A	N/A
Espessura nominal (mm)	N/A	N/A	0,940 (4,21%)	2,356 (9,01%)	2,540 (4,64%)
Sentido de fabricação ensaiado	Long.	Long.	Long.	Transv.	Transv.
Resistência à tração (kN/m)	21,86 (0,96%)	37,25 (1,34%)	50,92 (4,18%)	13,87 (11,23%)	17,24 (4,02%)
Deformação na ruptura (%)	11,38 (35,16%)	10,87 (3,45%)	14,84 (10,93%)	59,57 (5,02%)	90,86 (1,71%)

Nota: O coeficiente de variação de alguns itens é apresentado entre parênteses abaixo do valor médio obtido; N/A: não aplicável; Long.: sentido longitudinal de fabricação; Transv.: sentido transversal de fabricação.

¹ Os ensaios conduzidos com o GTNcurto foram utilizados para avaliar o desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos.

Uma segunda máquina de ensaios foi utilizada nos ensaios de tração dos geotêxteis não tecidos (GTNcont e GTNcurto), produzida por EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaios Ltda., modelo DL 10000. Este equipamento tem capacidade nominal de 98,1 kN (10.000 kgf) em ambos os sentidos (tração ou compressão) e foi empregado nos ensaios de tração mencionados acima com o uso de uma célula de carga aferida com capacidade de 30 kN. As deformações dos corpos de prova são determinadas a partir do deslocamento dos atuadores.

4.2. Meio confinante

O meio confinante dos ensaios de fluência conduzidos no novo equipamento foi reproduzido com dois solos: A e B. O solo A é uma areia de mineração, mal graduada, conhecida comercialmente por AF-0305, proveniente de uma jazida localizada no município de Descalvado, Estado de São Paulo, e fornecida pela Mineração Jundu Ltda. O solo B, por sua vez, é uma areia argilosa de média plasticidade, coletada no Campus II da Universidade de São Paulo, no município de São Carlos, Estado de São Paulo.

O solo A é referido como “areia” ao longo desta tese e foi caracterizado através de ensaios de análise granulométrica (ABNT NBR 7181), determinação da massa específica dos sólidos (ABNT NBR 6508) e de índices de vazios máximo (ABNT NBR 12004) e mínimo (ABNT NBR 12051) e de cisalhamento direto (ASTM D 3080). O solo B será referido apenas por “solo” e sua caracterização se deu por meio de ensaios de análise granulométrica (ABNT NBR 7181), limites de Atterberg (ABNT NBR 7180 e ABNT NBR 6459), determinação da massa específica dos sólidos (ABNT NBR-6508) e de compactação (ABNT NBR 7182). Os parâmetros de resistência desse material foram obtidos a partir de ensaios conduzidos por Kakuda (2005) e Freitas Neto (2008). A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas dos solos A e B. A Tabela 4.2 resume as propriedades verificadas dos solos utilizados nesta pesquisa como meio confinante nos ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento.

Figura 4.1 – Curvas granulométricas dos solos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 4.2 – Características dos materiais utilizados como meio confinante.

Propriedade	Solo A	Solo B
Nomenclatura adotada na tese	Areia	Solo
Peso específico dos sólidos (kN/m ³)	26,7	27,0
Índice de vazios máximo	0,75	N/A
Índice de vazios mínimo	0,57	N/A
Limite de liquidez (%)	N/A	40
Limite de plasticidade (%)	N/A	20
Índice de plasticidade (%)	N/A	20
Peso específico seco máximo (kN/m ³)	16,7	17,4 (Energia Normal)
Teor de umidade ótimo (%)	N/A	14,6 (Energia Normal)
Fração areia (%)	100	62
Fração silte (%)	0	4
Fração argila (%)	0	34
Classificação SUCS	SP	SC
Ângulo de atrito interno (°)	34,5 (D _r = 45%)	34,5 (GC = 96%) ¹ 36,0 (GC = 95%) ²
Intercepto coesivo (kPa)	0	30,0 (GC = 96%) ¹ 28,5 (GC = 95%) ²
Coefficiente de empuxo no repouso	0,42	--- ³

¹ Ensaios de cisalhamento direto (KAKUDA, 2005).

² Ensaios de compressão triaxial consolidado-drenado – CD (FREITAS NETO, 2008).

³ Determinação não conduzida.

N/A: não aplicável.

O solo A foi utilizado como meio confinante seco e com densidade relativa igual a 45%, resultante do procedimento padrão criado para o preenchimento da parte superior da câmara de ensaio, a ser descrito no item 3.4. Assim, os ensaios de cisalhamento direto com este material foram conduzidos nesta compactidade. Adicionalmente, como forma de caracterização da areia, realizaram-se ensaios de cisalhamento direto em outras condições de compactidade (densidade relativa igual a 20, 70 e 90%). A Figura 4.2 apresenta as envoltórias de resistência da areia nas diferentes condições avaliadas, a partir dos valores de pico e residual das curvas deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante. Os valores residuais foram considerados a 15 mm de deslocamento horizontal.

Valores de tensão cisalhante considerados (kPa)							
Pico				Residual			
Dr = 20%	Dr = 45%	Dr = 70%	Dr = 90%	Dr = 20%	Dr = 45%	Dr = 70%	Dr = 90%
17.5	19.1	20.3	22.2	14.4	14.9	15.0	14.9
33.2	34.1	35.3	40.0	27.1	26.8	27.1	27.6
64.6	68.2	72.8	75.2	52.2	51.3	52.4	49.0
$\phi_{pico} = 33,1^\circ$	$\phi_{pico} = 34,5^\circ$	$\phi_{pico} = 36,1^\circ$	$\phi_{pico} = 37,5^\circ$	$\phi_{res} = 27,8^\circ$	$\phi_{res} = 27,5^\circ$	$\phi_{res} = 28,0^\circ$	$\phi_{res} = 26,8^\circ$

Figura 4.2 – Envolórias de resistência da areia (solo A) em diferentes condições de compactidade, obtidas a partir dos valores de pico (a) e residuais (b) das curvas deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante de ensaios de cisalhamento direto.

A literatura sugere que a resistência ao cisalhamento das areias é independente da temperatura (AGAR; MORGENSTERN; SCOTT, 1987; GRAHAM; ALFARO; FERRIS, 2004). Portanto, uma vez que o novo equipamento permite a realização de ensaios de fluência aquecidos e confinados, fez-se necessário utilizar uma areia como meio confinante padrão nos ensaios conduzidos com temperatura elevada. Adicionalmente, a elevação da temperatura de ensaios confinados de fluência acarretaria alterações do teor de umidade de um solo compactado e, conseqüentemente, mudanças em suas propriedades. Por este motivo, a areia foi utilizada seca em todos os ensaios confinados e acelerados de fluência conduzidos com o novo equipamento.

O solo B foi empregado como meio confinante apenas em ensaios confinados de fluência conduzidos em temperatura ambiente, devido às implicações expostas no parágrafo anterior. Procedeu-se a compactação deste solo no compartimento superior da câmara de ensaio com grau de compactação igual a 92,5% e teor de umidade igual ao teor de umidade ótimo (14,6%). Os parâmetros de resistência apresentados na Tabela 4.2 foram obtidos por Kakuda (2005), através de ensaios de cisalhamento direto com grau de compactação igual a 96%, e Freitas Neto (2008), com ensaios de compressão triaxial com teor de umidade constante (CW), executados em corpos de prova compactados com grau de compactação igual a 95% e teor de umidade igual ao teor de umidade ótimo. Ambos os autores utilizaram

material coletado da mesma jazida, idêntica àquela de onde foi coletado o solo usado nesta pesquisa. Ressalta-se que este solo foi utilizado apenas em ensaios de fluência confinados, sem elevação da temperatura.

4.3. Descrição dos ensaios realizados

Quatro tipos de ensaios de fluência em geossintéticos foram conduzidos nesta pesquisa. A nomenclatura adotada para cada ensaio reflete as condições sob as quais eles foram realizados. Primeiramente, os ensaios convencionais de fluência (F) referem-se àqueles realizados com base na norma ASTM D 5262, com corpos de prova isolados e em temperatura ambiente. Os ensaios acelerados de fluência (FA), por sua vez, foram também conduzidos com corpos de prova não confinados, contudo em temperaturas maiores que a temperatura ambiente do laboratório. Os ensaios de fluência onde os solos A e B foram empregados para reproduzir o meio confinante do geossintético receberam a denominação de ensaios confinados de fluência (FC). Salienta-se que estes ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente. Por fim, os ensaios onde o corpo de prova estava submetido a temperaturas elevadas e inserido no meio confinante, simultaneamente, foram denominados ensaios confinado-acelerados de fluência (FCA). Os ensaios de fluência conduzidos com valores elevados de carregamento e que objetivaram a ruptura por fluência dos geossintéticos são indicados pelo subscrito “rup” após a letra ou sigla que os representa (e.g. F_{rup} , FC_{rup}). Além disso, optou-se por agrupar os ensaios acelerados, confinados e confinado-acelerados em um novo grupo, nomeado como ensaios não convencionais de fluência.

Os ensaios convencionais de fluência dos geotêxteis não tecidos foram realizados com cavaletes e suas deformações foram calculadas a partir da análise de imagens fotográficas tomadas em tempos conhecidos. Por outro lado, as geogrelhas e o geotêxtil tecido foram submetidos a ensaios convencionais de fluência em uma máquina de ensaios, a mesma apresentada no item 4.1 (fabricada por Instron Corporation, modelo 3385H), que possui sistema de vídeoextensometria para o cálculo das deformações dos corpos de prova. Optou-se, portanto, por conduzir os ensaios de fluência em equipamentos normalizados, de forma a permitir a obtenção de resultados comparáveis com a prática atual para a determinação do comportamento de fluência dos geossintéticos. Os demais ensaios (FA, FC e FCA) foram conduzidos com o novo equipamento de fluência de geossintéticos desenvolvido nesta pesquisa.

Conforme descrito no item 4.1, diferentes tipos de geossintéticos foram avaliados nesta pesquisa. Cada um deles foi submetido a uma série específica de ensaios, contando inclusive com a realização de ensaios de tração conduzidos após ensaios de fluência. A Tabela 4.3 resume as características desejadas dos ensaios de fluência conduzidos com cada geossintético, onde se observa a duração variável daqueles conduzidos no novo equipamento. Salienta-se que a série de ensaios executada com a geogrelha GG-PP inclui apenas ensaios de ruptura por fluência, portanto, com duração variável. Também foram realizados ensaios de ruptura por fluência com a geogrelha GG-PET. Adicionalmente, o Apêndice A apresenta os detalhes sobre cada ensaio realizado nesta pesquisa, juntamente com os valores obtidos em relação a cada parâmetro (nível de carregamento, temperatura e tensão normal).

Tabela 4.3 – Características desejadas dos ensaios de fluência realizados com cada geossintético.

Geossintético ¹	Parâmetro	Ensaio de fluência			
		F	FA	FC	FAC
GG-PP (Longitudinal)	Carregamento ²	60 a 90%	---	60 a 90%	---
	Temperatura	Ambiente	---	Ambiente	---
	Confinamento	0	---	50 kPa (Areia)	---
GG-PET (Longitudinal)	Carregamento ²	20 a 97,5%	50%	50 e 90%	50%
	Temperatura	Ambiente	45 e 60°C	Ambiente	45°C
	Confinamento	0	0	50 kPa (Areia/Solo)	50 kPa (Areia)
GTW (Longitudinal)	Carregamento ²	20 a 80%	30%	30%	30%
	Temperatura	Ambiente	40 e 60°C	Ambiente	40°C
	Confinamento	0	0	50 kPa (Areia)	50 kPa (Areia)
GTNcont (Transversal)	Carregamento ²	20 a 60%	60%	60%	60%
	Temperatura	Ambiente	40 e 60°C	Ambiente	40 e 60°C
	Confinamento	0	0	50 kPa (Areia)	50 kPa (Areia)
GTNcurto (Transversal)	Carregamento ²	20%	---	20%	20%
	Temperatura	Ambiente	---	Ambiente	50°C
	Confinamento	0	---	30 kPa (Areia)	30 kPa (Areia)

¹ O sentido de fabricação utilizado nos ensaios conduzidos nesta pesquisa são apresentados entre parênteses.

² Porcentagem da resistência à tração de cada geossintético.

As séries de ensaios de fluência com cada geossintético foram agrupadas segundo três objetivos. Primeiramente, aqueles conduzidos usando o GTNcurto permitiram a avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência de geossintéticos. Em seguida, o comportamento em fluência sob tração de GG-PET, GTW e GTNcont foi avaliado a partir de ensaios conduzidos sob carregamentos baixos em relação à resistência a tração de cada material. Por fim, ensaios de ruptura por fluência foram executados com ambas as geogrelhas (GG-PET e GG-PP) com o objetivo de avaliar a influência do confinamento do solo no tempo de ruptura dos geossintéticos em fluência. A Tabela 4.4 resume os objetivos de cada série de ensaios de fluência, com referência aos materiais empregados. Salienta-se que todos os geossintéticos foram submetidos a ensaios convencionais de fluência que serviram de comparação dos resultados obtidos em diversas condições de confinamento e temperatura com a prática atual.

Tabela 4.4 – Objetivos dos ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento.

Objetivo dos ensaios de fluência	Geossintéticos empregados
Desempenho do novo equipamento	GTNcurto
Comportamento em fluência	GG-PET ¹ ; GTW ¹ ; GTNcont
Ruptura por fluência	GG-PP; GG-PET

¹Geossintéticos submetidos a ensaios de tração após os ensaios de fluência.

Os ensaios convencionais de fluência usando GG-PET e GTW foram seguidos por ensaios de tração sem remoção do corpo de prova da máquina de ensaios. De forma similar, alguns corpos de prova destes materiais foram submetidos a ensaios de tração após o término do respectivo ensaio de fluência conduzido no novo equipamento. Contudo, nesses casos, o carregamento é removido e os corpos de prova são montados na máquina universal de ensaios. Essa série de ensaios permitiu caracterizar a resistência residual desses materiais.

É válido ainda ressaltar que, devido ao caráter pioneiro do equipamento de fluência, optou-se por realizar um número maior de ensaios, em contraste com a duração de cada um deles. Assim, os ensaios de fluência foram conduzidos até a obtenção de uma curva representativa do comportamento do geossintético em teste, com um mínimo de 10 horas.

A comparação entre os resultados dos ensaios de fluência nas diversas condições analisadas foi feita a partir da abordagem sugerida por Zornberg, Byler e Knudsen (2004). Assim, o principal parâmetro para avaliação do comportamento em deformação por fluência

dos geossintéticos estudados nesta pesquisa é o índice de fluência (T_α). Este parâmetro é representado pela inclinação das curvas de fluência obtidas em cada ensaio, conforme explicitado no item 2.3. Adicionalmente, os ensaios conduzidos em temperaturas elevadas foram avaliados a partir da conceituação do fator de translação apresentada no 2.5.1. Assim, as deformações por fluência ocorridas em temperaturas elevadas foram interpretadas como se tivessem ocorrido na temperatura de referência (temperatura ambiente) numa escala de tempo diferente, mais extensa. O procedimento para obtenção dos fatores de translação é apresentado a seguir para um exemplo genérico.

1) Determinação da curva de fluência.

Este procedimento foi realizado com todos os ensaios de fluência conduzidos nesta pesquisa e resulta na curva que relaciona a deformação total dos corpos de prova com o tempo de ensaio em escala logarítmica, exemplificada na Figura 4.3a.

2) Determinação do índice de fluência (T_α).

Este parâmetro é estabelecido a partir da inclinação da curva que relaciona o logaritmo da razão entre um tempo qualquer e o tempo no final da aplicação do carregamento ($\log(t/t_0)$) com as deformações por fluência (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004). A Figura 4.3b exemplifica esta curva a partir da curva de fluência mostrada na Figura 4.3a. Destaca-se que o valor de T_α é determinado no trecho linear desta curva.

Figura 4.3 – a) Exemplo de curva de fluência com o tempo em escala logarítmica; b) Representação gráfica das deformações por fluência proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004) para o ensaio em consideração.

3) Determinação do índice de fluência dos ensaios conduzidos em temperatura elevada.

Os passos 1 e 2 foram executados para um mínimo de dois ensaios, sendo um deles conduzido na temperatura de referência. Assim, tem-se pelo menos dois valores de

T_{α} , relacionados as suas respectivas temperaturas de ensaio (T_R como temperatura de referência e T_i como a temperatura elevada na qual o ensaio acelerado foi conduzido).

Tem-se, portanto, $T_{\alpha,R}$ na temperatura de referência e $T_{\alpha,i}$ na temperatura elevada T_i .

4) *Calcular o acréscimo de temperatura.*

Uma vez que a temperatura de referência foi considerada igual à temperatura ambiente nesta pesquisa, a diferença entre T_i e T_R é sempre positiva. Essa diferença foi calculada para todos os ensaios realizados em temperatura elevada.

5) *Calcular o fator de translação.*

O fator de translação relaciona o tempo para a ocorrência de um dado fenômeno em temperatura qualquer com o tempo para que o mesmo fenômeno ocorra em uma temperatura de referência. Assim, o inverso dos valores de $T_{\alpha,R}$ e $T_{\alpha,i}$ são empregados no cálculo do logaritmo do fator de translação. O fator de translação para cada um dos ensaios executados em temperatura elevada é dado pela Equação 11.

$$a_T = \frac{t_{1\%,i}}{t_{1\%,R}} = \frac{\frac{1}{T_{\alpha,i}}}{\frac{1}{T_{\alpha,R}}} \quad \text{Equação 11}$$

onde a_T é o fator de translação, $t_{1\%,i}$ é o tempo necessário para que uma deformação unitária ocorra em temperatura elevada, $t_{1\%,R}$ é o tempo necessário para que uma deformação unitária ocorra na temperatura de referência, $T_{\alpha,i}$ é o índice de fluência do ensaio com temperatura elevada i e $T_{\alpha,R}$ é o índice de fluência do ensaio na temperatura de referência.

6) *Calcular a duração do ensaio caso fosse executado na temperatura de referência.*

A duração que um ensaio conduzido em temperatura elevada teria se fosse conduzido na temperatura de referência é igual à razão entre a duração real do ensaio e o fator de translação, conforme apresentado na Equação 12.

$$t_R = \frac{t_i}{a_T} \quad \text{Equação 12}$$

onde t_R é a duração de um ensaio acelerado se fosse conduzido na temperatura de referência, t_i é a duração real do ensaio em temperatura elevada e a_T é o fator de translação.

A determinação do tempo fictício de cada ensaio acelerado, i.e. a duração do ensaio caso este fosse executado na temperatura de referência, permitiu avaliar a resistência residual dos geossintéticos e plotar gráficos que relacionam o fator de translação com o acréscimo de temperatura, com corpos de prova em isolamento e em condição confinada. Esses itens serão apresentados no Capítulo 5.

Como pôde ser visto na Tabela 4.3, dois níveis de pressão na bolsa de ar foram empregados nos ensaios de fluência sob a condição de confinamento em solo ou areia: 30 e 50 kPa. Adicionado a isso, salienta-se que a área de contato entre o corpo de prova e cada geomembrana é igual a $0,03 \text{ m}^2$ e que, devido ao contato duplo com as geomembranas, o corpo de prova está sujeito à força de atrito nas suas faces superior e inferior. Dessa forma, a força de atrito de interface desenvolvida na interface corpo de prova-geomembrana será igual a 159 e 266 N nos ensaios conduzidos com pressão de ar na bolsa inflável iguais a 30 e 50 kPa, respectivamente.

Subtraíram-se os valores de força de atrito de interface daqueles registrados pelas células de carga em cada ensaio confinado e confinado-acelerado de fluência conduzido nesta pesquisa. Ainda assim, a solicitação que atinge a faixa de interesse dos corpos de prova permaneceu próxima àquela aplicada pelo sistema de carregamento do novo equipamento para ensaios de fluência em geossintéticos. As maiores diferenças foram encontradas nos ensaios realizados com a GG-PP. Contudo, uma vez que este material foi submetido apenas à ensaios de ruptura por fluência, foram registrados o nível de carregamento empregado juntamente com o tempo para ruptura e, portanto, não prejudicam a interpretação dos resultados, como será explicitado no item 5.3.2. A Tabela 4.5 apresenta as solicitações de tração desejadas em cada ensaio de fluência conduzido no novo equipamento, juntamente com os valores médios registrados pelas células de carga e aqueles que atingem a faixa de interesse dos corpos de prova, calculado a partir da subtração descrita acima. Adicionalmente, apresentam-se entre parênteses na Tabela 4.5 os coeficientes de variação destes valores médios. É válido ressaltar que os ensaios acelerados de fluência não contam com a subtração do atrito entre os corpos de prova e as geomembranas em relação aos valores registrados nas células de carga devido à ausência do confinamento em solo ou em areia.

Tabela 4.5 – Solicitação de tração em cada ensaio realizado no novo equipamento de fluência em geossintéticos.

Designação do ensaio	Tipo de ensaio	Solicitação ¹ desejada (%)	Solicitação ¹ registrada nas células de carga (%) ²	Solicitação ¹ que atingiu a faixa de interesse (%)
GG-PP-7	FC _{rup}	60	59,44 (0,97%)	48,46
GG-PP-8	FC _{rup}	70	69,54 (1,35%)	58,55
GG-PP-9	FC _{rup}	80	79,57 (1,15%)	68,59
GG-PP-10	FC _{rup}	90	88,57 (0,85%)	77,58
GG-PET-31	FA	50	49,79 (0,39%)	49,79
GG-PET-32	FA	50	48,88 (1,50%)	48,88
GG-PET-33	FA	50	50,27 (0,91%)	50,27
GG-PET-34	FC	50	50,09 (1,03%)	46,48
GG-PET-35	FC	50	49,77 (1,42%)	46,16
GG-PET-36	FC	50	50,28 (1,24%)	46,67
GG-PET-37	FC _{rup}	90	89,86 (0,85%)	81,44
GG-PET-38	FCA	50	50,15 (1,53%)	46,54
GTW-9	FA	30	29,21 (1,37%)	29,21
GTW-10	FA	30	29,29 (3,50%)	29,29
GTW-11	FA	30	28,10 (4,55%)	28,10
GTW-12	FC	30	29,92 (0,76%)	27,31
GTW-13	FCA	30	30,02 (1,30%)	27,41
GTNcont-6	FA	60	61,16 (1,54%)	61,16
GTNcont-7	FA	60	60,47 (1,81%)	60,47
GTNcont-8	FC	60	59,98 (1,27%)	50,39
GTNcont-9	FCA	60	60,77 (3,15%)	51,18
GTNcont-10	FCA	60	59,24 (1,04%)	49,65
GTNcurto-2	FC	20	19,77 (1,39%)	15,16
GTNcurto-3	FCA	20	19,51 (1,52%)	14,90

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência à tração do respectivo geossintético (ASTM D 6637).

²Os valores apresentados entre parênteses referem-se aos coeficientes de variação obtidos com a consideração de todas as leituras registradas pelas células de cargas.

5. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos a partir de ensaios de fluência conduzidos em cinco tipos diferentes de geossintéticos são apresentados e discutidos neste capítulo. Cada geossintético foi submetido a uma série específica de ensaios de fluência, utilizando-se tanto o aparato convencional, descrito nas normas técnicas vigentes, como o novo equipamento de fluência de geossintéticos desenvolvido nesta pesquisa.

Os ensaios apresentados neste capítulo foram agrupados de acordo com o objetivo de sua execução. Primeiramente, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de fluência realizados com o GTNcurto (item 5.1), que foram utilizados para verificar o desempenho geral do novo equipamento. O comportamento em deformação por fluência sob tração de três geossintéticos (GG-PET, GTW e GTNcont) foi verificado em diferentes condições de confinamento e temperatura e é apresentado no item 5.2. O item 5.3 trata do comportamento da GG-PET e da GG-PP na ruptura por fluência através da comparação entre ensaios conduzidos com corpos de prova isolados e sob o confinamento em areia. Posteriormente, o item 5.4 apresenta e discute os resultados dos ensaios de tração dos geossintéticos (GG-PET e GTW) realizados após ensaios de fluência em diversas condições. Por fim, o item 5.5 apresenta as considerações finais pertinentes a este capítulo.

5.1. Ensaio para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos

O novo equipamento de fluência em geossintéticos é composto por diversos sistemas responsáveis pela aplicação e manutenção do carregamento constante, medição do alongamento dos corpos de prova, elevação e manutenção da temperatura de ensaio, reprodução do meio confinante e aquisição dos dados. Estes sistemas são descritos detalhadamente no item 3.2, juntamente com suas respectivas verificações individuais. O desempenho geral do novo equipamento de fluência em geossintéticos foi, por sua vez, avaliado a partir de dois ensaios conduzidos com um geotêxtil não tecido (GTNcurto), com corpos de prova sob confinamento em areia (GTNcurto-2 e GTNcurto-3). O primeiro teste foi conduzido em temperatura ambiente (FC) e o segundo, em temperatura elevada aproximadamente igual a 50°C (FCA).

5.1.1. Sistema de carregamento

A solicitação de tração foi acompanhada durante os ensaios conduzidos no novo equipamento por meio de células de carga instaladas nas duas extremidades do mesmo. Este procedimento foi tomado para verificar a capacidade do novo equipamento em submeter os corpos de prova a um carregamento constante. Salienta-se que estes ensaios foram conduzidos com corpos de prova submetidos, supostamente, a 20% da resistência à tração do geossintético. A Figura 5.1 apresenta a evolução da solicitação de tração registrada pelas células de carga *versus* o tempo decorrido em cada ensaio mencionado nesta etapa. Os valores de solicitação de tração estão representados como uma porcentagem da resistência à tração do geossintético. Houve uma interrupção na aquisição dos dados do ensaio confinado-acelerado de fluência com o GTNcurto devido a um problema de configuração do *software* de um dos elementos do sistema de aquisição dos dados (Aquisitor P3). Este problema foi imediatamente solucionado e os demais ensaios puderam ser executados.

Figura 5.1 – Evolução da solicitação de tração durante os ensaios confinado e confinado-acelerado conduzidos com o GTNcurto para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos: a) Ensaio confinado de fluência; b) Ensaio confinado de fluência, escala vertical aumentada; c) Ensaio confinado-acelerado de fluência; d) Ensaio confinado-acelerado de fluência, escala vertical aumentada.

Verifica-se que as leituras das células de carga variaram em torno de um valor médio devido à correção do carregamento por meio da adição de elementos metálicos ao total de pesos livres. Este procedimento foi necessário devido às pequenas variações nos registros das células de carga. Os acréscimos no carregamento são visíveis quando a escala do eixo das ordenadas é aumentada, como ilustrado nas Figura 5.1b e Figura 5.1d. Contudo, essa variação em torno dos valores médios foi desprezível, uma vez que a solicitação média registrada pelas células de carga foi similar àquela desejada (19,77% e 19,51% para os ensaios confinado e confinado-acelerado, respectivamente) com coeficiente de variação das leituras aceitável (1,62% para o ensaio confinado e 1,52% para o ensaio confinado-acelerado). Assim, os resultados indicam que o novo equipamento é capaz de aplicar um carregamento satisfatoriamente constante aos corpos de prova.

O intervalo entre as leituras das células de carga foi variável, com valores menores nos primeiros minutos de ensaio, seguidos por leituras cada vez mais espaçadas ao longo do mesmo. Assim, em muitos casos, devido à maior quantidade de dados em um determinado período, a média aritmética dos valores registrados pelas células de carga não é representativa do ensaio. O cálculo da solicitação média registrada pelas células de carga nos ensaios apresentados na Figura 5.1 considerou, portanto, o intervalo de tempo entre as leituras, conforme apresentado na Equação 13. Adicionalmente, cada ensaio foi referido a apenas um único valor, computado como a média aritmética da solicitação média obtida em cada célula de carga. A Figura 5.2 ilustra a evolução da solicitação de tração registrada no ensaio confinado conduzido com o GTNcurto, bem como seus valores médios calculados sem considerar o intervalo entre leituras (média aritmética dos registros) e através da Equação 13.

$$Q_{\text{méd}} = \frac{\sum \left[\frac{(Q_i + Q_{i-1})}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \right]}{t_{\text{total}}} \quad \text{Equação 13}$$

onde $Q_{\text{méd}}$ é a razão entre a solicitação de tração média dos ensaios de fluência e a resistência à tração do geossintético, em %; Q_i é o i -ésimo registro de solicitação da célula de carga, em %; t_i é o tempo referente ao i -ésimo registro de solicitação da célula de carga, em horas; t_{total} é o tempo total do ensaio, em horas.

Figura 5.2 – Exemplo do cálculo da solicitação de tração média (ensaio confinado de fluência conduzido com o GTNcurto).

A solicitação média calculada considerando-se apenas os registros das células de carga resultou em um valor visivelmente equivocado (linha tracejada em amarelo na Figura 5.2). Isso ocorre porque existe uma variação no intervalo entre as leituras das células de carga, registradas a cada segundo entre o início do ensaio e 0,11 horas (325 registros); a cada 30 segundos entre 0,11 e 0,88 horas (92 registros); a cada dois minutos entre 0,88 e 1,88 horas (31 registros); a cada 5 minutos entre 1,88 e 39,97 horas (458 registros); e a cada 20 minutos entre 39,97 e o fim do ensaio (113,73 horas, 222 registros). Dessa forma, apesar de terem sido mantidos por um tempo maior, os dois últimos intervalos citados possuem número de registros semelhantes àquele do primeiro intervalo, com duração de apenas 6,4 minutos.

O cálculo da solicitação média com a consideração do tempo entre as leituras das células de carga, por sua vez, apresenta-se mais condizente com o gráfico apresentado na Figura 5.2 (linha tracejada em preto). Este procedimento pondera a solicitação de tração em cada registro em função do intervalo entre as leituras. Assim, este cálculo foi adotado em todos os ensaios subsequentes.

5.1.2. Sistema de aquecimento

O desempenho do sistema de aquecimento foi verificado por meio do ensaio confinado-acelerado de fluência com o GTNcurto (GTNcurto-3). As leituras dos termopares foram registradas constantemente durante a preparação, montagem e execução deste ensaio. A

Figura 5.3 apresenta o registro completo de temperatura obtido no ensaio GTNcurto-3, apontando os valores lidos no compartimento inferior da câmara de ensaio pelo termopar 1, próximo às resistências elétricas, e no compartimento superior, registrado pelo termopar 2 nas proximidades do corpo de prova. Adicionalmente, as Figura 5.3b e Figura 5.3c apresentam o mesmo registro, com escalas diferentes no eixo das abscissas (tempo). A temperatura programada pelo operador deste ensaio foi 60°C.

Figura 5.3 – Evolução da temperatura registrada pelos termopares durante o ensaio confinado-acelerado conduzido com o GTNcurto para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos: a) Registro completo; b) Destaque para as quedas de energia; c) Destaque para o início do registro.

Apesar da grande variação na temperatura registrada no compartimento inferior da câmara de ensaio, a temperatura registrada no seu compartimento superior atinge um valor praticamente constante após cerca de nove horas. O ensaio de fluência foi iniciado apenas após esse patamar ser atingido, procedimento tomado como padrão em todos os ensaios conduzidos com o novo equipamento de fluência em geossintéticos utilizando a elevação de temperatura. Apesar da ocorrência de duas quedas de energia com duração de 45 e 30 minutos, em destaque na Figura 5.3b, o coeficiente de variação da temperatura registrada no compartimento superior foi igual a 0,93%, com valor médio igual a 49,3°C. Os valores mínimo e máximo registrados pelo termopar 2 durante o ensaio de fluência foram 45,7 e 50,1°C, respectivamente. Caso as quedas de energia fossem desconsideradas, os valores

médio, máximo e mínimo seriam iguais a 49,4, 50,1 e 47,1°C, respectivamente, com coeficiente de variação igual a 0,65%. Assim, conclui-se que as quedas de energia não tiveram um efeito significativo na temperatura de ensaio. Destaca-se, ainda, a capacidade do sistema de aquecimento em manter a temperatura aproximadamente constante próximo ao corpo de prova.

Como procedimento para otimizar a execução dos ensaios, procurou-se realizar aqueles a serem conduzidos em temperatura elevada em sequência. Assim, reduziu-se o tempo de espera para a elevação da temperatura nas proximidades dos corpos de prova. A Figura 5.3c ilustra as consequências desta metodologia, a partir do mesmo registro de temperatura, com destaque para sua parte inicial. Percebe-se que a temperatura registrada no compartimento superior (linha azul) encontra-se, inicialmente, elevada em um valor aproximadamente igual a 45°C. Em seguida, este valor decresce repentinamente até a temperatura ambiente ($\approx 20^\circ\text{C}$). Este comportamento ocorreu devido à retirada do termopar 2 do interior do compartimento superior da câmara de ensaio após a conclusão de um ensaio de fluência em temperatura elevada. Assim, o termopar 2 estava em uma temperatura elevada e, subitamente, passou a registrar a temperatura ambiente.

A temperatura registrada pelo termopar 2 foi mantida igual à temperatura ambiente por cerca de duas horas (Figura 5.3c). Em seguida, o registro da temperatura no compartimento superior sofre um aumento pequeno, porém também repentino, para cerca de 29°C. A partir deste ponto, este valor apresenta um crescimento contínuo até atingir o patamar considerado como o valor da temperatura do corpo de prova durante o ensaio de fluência (49,3°C). O intervalo de tempo que o registro do termopar 2 permanece igual à temperatura ambiente é devido à montagem do referido ensaio. Em seguida, o incremento súbito da temperatura registrada pelo termopar 2 foi provocado pela sua inserção no interior do compartimento superior da câmara de ensaio após a montagem do ensaio em questão. Por fim, esperou-se que a temperatura registrada pelo termopar 2 atingisse um patamar constante, processo que demorou cerca de nove horas, como explicitado anteriormente.

O sistema de aquecimento foi também usado para registrar a temperatura no interior da câmara durante o ensaio confinado de fluência usando o GTNcurto (GTNcurto-2). Assim, um valor de temperatura menor que a temperatura ambiente foi programado para ser atingido no compartimento inferior da câmara de ensaio. Como resultado, as resistências elétricas não foram ativadas e o sistema de aquecimento foi empregado apenas para registrar as leituras de temperatura. Esse registro é apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Evolução da temperatura registrada pelos termopares durante o ensaio confinado conduzido com o GTNcurto para avaliação do desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos: a) Registro completo; b) Destaque para o início do registro.

As temperaturas registradas pelos dois termopares variaram em torno de um valor praticamente constante. O valor médio da temperatura no compartimento superior da câmara de ensaio foi 21,9°C, com coeficiente de variação igual a 1,29%. Os valores mínimo e máximo registrados pelo termopar 2 durante este ensaio foram 21,4 e 22,4°C, respectivamente. A Figura 5.4b apresenta o mesmo registro, com escala aumentada no eixo das abscissas. A partir dessa figura, percebe-se que esse ensaio foi realizado após um ensaio conduzido em temperatura elevada, visualizado pelo valor medido no compartimento superior (aproximadamente 50°C). Por esse motivo, foi necessário esperar o esfriamento do compartimento inferior e o ensaio de fluência só foi iniciado quando a sua temperatura atingiu um valor próximo à temperatura ambiente.

Como resultado do uso do sistema de aquecimento para registrar a temperatura no compartimento superior, todos os ensaios conduzidos com o novo equipamento possuem um registro semelhante, inclusive aqueles realizados em temperatura ambiente. Dessa forma, o registro de temperatura de cada ensaio é composto pelos valores obtidos nos compartimentos superior (corpo de prova) e inferior (resistências elétricas), juntamente com o valor programado pelo operador e as marcas de início e fim do respectivo ensaio de fluência.

5.1.3. Desempenho geral do equipamento

Esta seção apresenta os resultados de três ensaios de fluência conduzidos com o GTNcurto. Dois deles foram realizados com o novo equipamento desenvolvido nesta pesquisa com o propósito de verificar o seu desempenho. Um terceiro ensaio de fluência

(convencional) foi executado com aparato normalizado para comparação dos resultados com a prática atual. A Figura 5.5 apresenta as curvas de fluência obtidas nestes ensaios, com o tempo representado em escala natural.

Figura 5.5 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcurto.

As deformações do corpo de prova utilizado no ensaio convencional de fluência foram calculadas a partir da análise de imagens fotográficas tomadas em tempos conhecidos. Por este motivo a Figura 5.5 apresenta apenas 20 pontos na série de dados referente a este ensaio. As demais séries de dados, que indicam os ensaios confinado e confinado-acelerado de fluência, por outro lado, apresentam uma sequência de pontos registrados com frequência maior. Portanto, possuem o aspecto de uma linha contínua. Salienta-se a presença de uma lacuna nas leituras referentes ao ensaio confinado-acelerado de fluência devido a uma queda no fornecimento de energia elétrica do laboratório.

Apesar da representação gráfica da curva de fluência em escala natural (Figura 5.5) indicar algumas diferenças entre os ensaios de fluência realizados com o GTNcurto, preferiu-se fazer a análise dos resultados por meio de curvas de fluência com o tempo representado em escala logarítmica. Essa representação possibilita uma melhor visualização da inclinação das retas obtidas por regressão logarítmica. A Figura 5.6 apresenta, portanto, as curvas de fluência obtidas com o GTNcurto, com o tempo em escala logarítmica. Destaca-se que são plotados apenas alguns pontos nas séries de dados indicativas de cada ensaio. Esta medida foi adotada para facilitar a visualização dos resultados.

Figura 5.6 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcurto representadas com o tempo em escala logarítmica.

A análise da Figura 5.6 permite avaliar a dependência do comportamento em fluência do GTNcurto em relação à temperatura e ao confinamento em areia. Verificou-se uma redução de cerca de 35% nas deformações iniciais devido à aplicação de uma tensão vertical igual a 30 kPa em temperatura ambiente. A deformação inicial esperada para o ensaio confinado-acelerado é maior que aquela obtida no ensaio confinado. Contudo, este comportamento não foi observado, resultando em um valor menor para o ensaio confinado-acelerado, onde a temperatura é maior.

A ocorrência de deformações iniciais maiores no ensaio confinado em relação às ocorridas no ensaio confinado-acelerado pode ser explicada pela sua dependência em relação à taxa de aplicação do carregamento. Devido ao método manual de aplicação do carregamento utilizado no novo equipamento de fluência em geossintéticos, este parâmetro ainda é condicionado pelo operador do ensaio. Assim, apesar do funcionamento satisfatório do novo equipamento de fluência de geossintéticos, este aspecto precisa ser melhorado. Por este motivo, a análise das deformações por fluência, representadas pela inclinação da reta obtida pela regressão logarítmica dos dados, foi feita com base na proposta de Zornberg, Byler e Knudsen (2004). Esta proposta divide as deformações totais em deformações iniciais e deformações por fluência e apresenta o conceito de índice de fluência (T_a), conforme explicitado no item 2.3. Pode-se destacar que o valor de T_a é igual à inclinação das retas obtidas pelos ajustes logarítmicos dos dados de fluência, apresentadas na Figura 5.6, conforme ilustra a sequência de cálculo a seguir.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_F$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + T_\alpha \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + T_\alpha \cdot [\log(t) - \log(t_0)]$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + T_\alpha \cdot \log(t) - T_\alpha \cdot \log(t_0)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - T_\alpha \cdot \log(t_0) + T_\alpha \cdot \log(t)$$

$$\varepsilon = b + T_\alpha \cdot \log(t), \text{ onde } b = \varepsilon_0 - T_\alpha \cdot \log(t_0)$$

Assim, a comparação entre os valores de índice de fluência (T_α) indica a velocidade com que as deformações por fluência ocorrem. A Figura 5.7 apresenta os resultados dos ensaios de fluência conduzidos com o GTNcurto, em termos de deformações por fluência.

Figura 5.7 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcurto, segundo a proposta de Zornberg, Byler e Knudsen (2004).

Apesar dos ensaios de fluência com o GTNcurto terem sido conduzidos durante o um período similar (cerca de 100 horas), verificou-se que as séries de dados referentes aos ensaios conduzidos com o novo equipamento atingiram valores de $\log(t/t_0)$ menores que aqueles alcançados no ensaio convencional. Isso se deve a uma demora maior na aplicação do carregamento ocorrida nos ensaios realizados com o novo equipamento. Assim, o valor de t_0 é maior e, conseqüentemente, os valores de $\log(t/t_0)$ serão menores. Para evitar que o mesmo evento ocorresse nos demais ensaios conduzidos com os outros materiais, estabeleceu-se uma rotina de aplicação do carregamento mais rígida.

Apesar do comportamento descrito no parágrafo anterior ter sido percebido, a dependência da fluência do GTNcurto em relação ao confinamento em areia e à temperatura é

facilmente verificada nos valores de índice de fluência mostrados na Figura 5.7. O confinamento em areia com tensão vertical igual a 30 kPa causou uma redução de cerca de 80% no índice de fluência deste material. Isto significa que este geossintético experimentaria praticamente um quinto das deformações por fluência em relação àquelas previstas a partir de ensaios convencionais com este nível de carregamento (20% da resistência à tração).

O ensaio confinado-acelerado ilustra, por sua vez, como é possível acelerar as deformações por fluência através da temperatura de ensaio. O índice de fluência deste ensaio foi 125% maior que o obtido no ensaio confinado. Em outras palavras, um incremento de 27,4°C foi capaz de causar tal incremento no índice de fluência. Com a devida interpretação e a execução de ensaios adicionais, estes dados podem ser utilizados para compor uma curva mestra de fluência para este geossintético, submetido a 30 kPa de tensão normal.

Os ensaios apresentados neste item mostraram que o novo equipamento de fluência em geossintéticos apresentou um desempenho satisfatório para execução de ensaios confinado e confinado-acelerados. Optou-se por não executar ensaios acelerados de fluência nesta etapa da pesquisa, uma vez que se apresentam como uma condição simplificada em relação aos ensaios confinado-acelerados. Este tipo de ensaio foi realizado com outros geossintéticos, como será descrito no item 5.2. Os ensaios de desempenho do novo equipamento também permitiram melhorar a rotina de montagem e desmontagem dos ensaios.

5.2. Ensaios para avaliação do comportamento em deformação por fluência sob tração

Este item apresenta e discute os resultados dos ensaios conduzidos com o propósito de avaliar o comportamento em deformação por fluência sob tração de três geossintéticos (GG-PET, GTW e GTNcont). Uma vez que sequências de ensaios distintas foram realizadas com cada material, optou-se por subdividi-lo em três seções, cada qual referente a um material.

5.2.1. Geogrelha biaxial de poliéster (GG-PET)

A série de ensaios realizados com a GG-PET é composta pelos quatro tipos de ensaios de fluência executados nesta pesquisa, todos conduzidos no sentido longitudinal de

fabricação do geossintético. Ensaios convencionais de fluência foram realizados com carregamento entre 20 e 80% da resistência à tração do material. Em seguida optou-se por avaliar o comportamento em deformação por fluência com carregamentos iguais a 50% da sua resistência à tração. Assim, os ensaios confinados, acelerados e confinado-acelerados de fluência foram executados com este nível de solicitação de tração.

5.2.1.1. Ensaios convencionais de fluência

Uma série de ensaios convencionais foi conduzida com a GG-PET com o propósito de caracterizar este material no tocante às deformações por fluência sob tração. Esses ensaios foram executados durante 10 horas, valor satisfatório para individualizar as curvas referentes a cada nível de carregamento. Adicionalmente, uma vez que os ensaios realizados com o novo equipamento de fluência não foram conduzidos até 1.000 horas, ensaios convencionais com 10 horas de duração foram suficientes para verificar a influência do confinamento e da temperatura no comportamento de fluência da GG-PET. A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios convencionais de fluência executados com a GG-PET.

Figura 5.8 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios convencionais conduzidos com GG-PET.

As deformações iniciais devido à aplicação da solicitação de tração foram claramente proporcionais ao nível de carregamento. Essa variação mostrou-se linear quando as duas grandezas são representadas em escala natural (Figura 5.9a). Por outro lado, os valores de índice de fluência obtidos a partir do ajuste logarítmico das curvas de fluência apresentadas na Figura 5.8 não exibiram um ajuste linear satisfatório (Figura 5.9b).

Adicionalmente, os valores de T_a dos corpos de prova submetidos a 30% da resistência à tração foram maiores que aqueles encontrados em corpos de prova submetidos a carregamento maiores (e.g. 40, 50 e 60%). Ainda assim, optou-se por adotar uma regressão linear, por medida de simplificação e em acordo com a sugestão de Zornberg, Byler e Knudsen (2004).

Figura 5.9 – Deformação inicial (a) e índice de fluência (b) obtidos nos ensaios convencionais de fluência em função do nível de carregamento aplicado (ensaios com GG-PET).

A escolha do nível de carregamento a ser utilizado nos ensaios de fluência executados com o novo equipamento baseou-se nos resultados obtidos nos ensaios convencionais. Selecionou-se o nível de carregamento igual a 50%. A aplicação deste valor é viável com a atual configuração do novo equipamento de fluência em geossintéticos, resultando num carregamento aproximadamente igual a 3,68 kN. Esta solicitação foi atingida com a utilização de um total de cerca de 63 kgf em pesos livres em cada extremidade do novo equipamento. Adicionalmente, devido ao atrito entre a geomembrana e os corpos de prova definido no item 3.3.1.1, previu-se uma variação no carregamento que atingiria os corpos de prova. Assim, a opção de utilizar o nível de carregamento igual a 50% foi também embasada no fato de este valor encontrar-se entre outros níveis de carregamento empregados nos ensaios convencionais.

5.2.1.2. Ensaios não convencionais de fluência

A GG-PET foi submetida a sete ensaios não convencionais de fluência: três acelerados, três confinados e um confinado-acelerado. Os ensaios acelerados de fluência foram conduzidos em temperaturas diferentes (43 e 60°C), havendo a repetição do ensaio realizado em 60°C. Em seguida são apresentados os ensaios confinados de fluência, nos quais

os corpos de prova foram submetidos a uma tensão normal igual 50 kPa. A areia foi empregada em dois deles como meio confinante, de forma a ter ensaios idênticos para verificar a repetibilidade dos resultados. O solo foi utilizado no terceiro ensaio confinado de fluência. Este foi o único ensaio onde este material foi usado como meio confinante nesta pesquisa. Por fim, um ensaio confinado-acelerado de fluência foi conduzido com o corpo de prova confinado em areia (50 kPa) e a uma temperatura igual a 44°C.

5.2.1.2.1. Ensaios acelerados de fluência

A GG-PET foi submetida a ensaios acelerados de fluência em duas temperaturas distintas (43 e 60°C). As curvas de fluência obtidas nestes ensaios são apresentadas na Figura 5.10, com o tempo representado em escala logarítmica.

Figura 5.10 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GG-PET em duas temperaturas (43 e 60°C): a) Todos os resultados; b) Resultados selecionados para análise.

Alguns problemas foram encontrados na execução dos ensaios acelerados de fluência da GG-PET. No primeiro deles, conduzido a 43°C, houve duas interrupções no registro dos dados: durante a aplicação do carregamento e início das deformações por fluência e após alguns minutos do fim da aplicação do carregamento. A suspensão das leituras durante a aplicação do carregamento e início das deformações por fluência do material durou menos que dois minutos e não afetou o objetivo de verificar essas deformações no geossintético. A segunda interrupção persistiu por pouco menos de 14 horas e ocorreu durante a fase de fluência do geossintético. Contudo, os dados adquiridos após esse período, se ajustam satisfatoriamente com a regressão linear tomada a partir do trecho inicial da curva de fluência da GG-PET ensaiada a 43°C. Dessa forma, foi possível adotar esta regressão linear como característica deste material nas condições empregadas.

O segundo ensaio acelerado de fluência com a GG-PET foi conduzido a 60°C (linha azul na Figura 5.10a). Percebe-se claramente que a aplicação do carregamento não foi realizada com sucesso, provocando leituras de deformação excessivas. Os valores elevados de deformação atingidos na etapa de aplicação da solicitação de tração ao corpo de prova podem ter contribuído para a diminuição das deformações por fluência obtidas neste ensaio. Assim, optou-se por repetir esta montagem com um novo corpo de prova e submetê-lo ao mesmo carregamento sob a mesma temperatura (linha vermelha na Figura 5.10a e Figura 5.10b). A Figura 5.11 ilustra a aplicação do carregamento nos dois ensaios acelerados conduzidos a 60°C com a GG-PET. Salienta-se que o tempo está representado em minutos nesta figura.

Figura 5.11 – Aplicação da solicitação de tração nos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GG-PET a 60°C: a) Ensaio descartado (CP-1); b) Ensaio considerado (CP-2).

Verifica-se que a aplicação do carregamento no primeiro ensaio acelerado conduzido a 60°C levou o corpo de prova a uma solicitação superior àquela desejada (50% da resistência à tração). No segundo ensaio, por outro lado, a aplicação da solicitação de tração ocorreu suavemente (Figura 5.11b), permitindo a obtenção de resultados mais confiáveis. Assim, optou-se por descartar o primeiro ensaio acelerado conduzido a 60°C e utilizar apenas os resultados obtidos com o segundo corpo de prova.

Os valores de índice de fluência calculados nos ensaios acelerados foram iguais a 0,330 e 0,705, para temperaturas iguais a 43 e 60°C, respectivamente. Adicionalmente, as deformações iniciais computadas nestes ensaios foram iguais a 8,39% e 5,57%, respectivamente.

5.2.1.2.2. Ensaios confinados de fluência

Três ensaios confinados de fluência foram conduzidos com a GG-PET, submetendo o corpo de prova a uma solicitação aproximadamente igual a 46% da resistência à tração do geossintético. Estes ensaios foram conduzidos em temperatura ambiente e dois deles utilizaram areia como meio confinante, enquanto o solo foi empregado no terceiro ensaio. A Figura 5.12 apresenta as curvas de fluência, juntamente com os valores de índice de fluência obtidos nestes experimentos.

Figura 5.12 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios confinados de fluência conduzidos com GG-PET em temperatura ambiente.

Pode-se perceber valores pouco significativos nas deformações por fluência da GG-PET nos corpos de prova submetidos ao confinamento em solo ou areia. O valor de índice de fluência encontrado para o ensaio com o corpo de prova confinado em solo foi igual a 0,059. Nos ensaios com corpos de prova confinados em areia, estes valores foram ainda menores (0,003 e 0,014).

5.2.1.2.3. Ensaio confinado-acelerado de fluência

Um único ensaio confinado-acelerado de fluência foi executado com a GG-PET. Este ensaio foi conduzido com temperatura média igual a 44,1°C, com o corpo de prova confinado em areia e submetido a uma tensão vertical igual a 50 kPa. A Figura 5.13 ilustra a aplicação do carregamento, juntamente com a curva de fluência obtida neste ensaio.

Figura 5.13 – Aplicação do carregamento (a) e curva de fluência (b) obtidos a partir do ensaio confinado-acelerado de fluência conduzido com GG-PET a 44,1°C e com corpo de prova confinado em areia e submetido a uma tensão normal igual a 50 kPa.

O ensaio confinado-acelerado de fluência realizado com a GG-PET foi satisfatório. Apesar da ocorrência de patamares durante a aplicação do carregamento e da redução do valor mensurado na célula de carga 1 entre 0,4 e 0,9 horas, as deformações ocorreram de forma suave e contínua. Assim, estes fatores não foram significativos na análise dos resultados. O índice de fluência obtido neste ensaio é igual a 0,156, com deformação inicial igual a 6,81%.

5.2.1.3. Análise dos resultados – GG-PET

Os ensaios de fluência comparados neste item se referem àqueles realizados com um carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração da GG-PET. Entre os ensaios executados com corpos de prova confinados, consideram-se apenas aqueles nos quais os corpos de prova foram confinados em areia. Salienta-se que diferentes condições foram utilizadas, em relação ao confinamento e à temperatura de ensaio. A Figura 5.14 apresenta as curvas de fluência obtidas nos ensaios conduzidos com carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético. É válido ressaltar que a redução no carregamento aplicado aos corpos de prova nos ensaios confinados em areia devido ao atrito com as geomembranas não afetou a interpretação dos resultados.

Figura 5.14 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios de fluência conduzidos com GG-PET com carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético.

A representação gráfica de todos os ensaios utilizados para verificar o comportamento de fluência da GG-PET apresentada na Figura 5.14 dificulta a visualização do efeito da temperatura e do confinamento em areia na fluência do geossintético devido à variabilidade nos valores de deformação inicial. Assim, os resultados são novamente mostrados na Figura 5.15, porém apenas em termos de deformações por fluência, segundo a proposta de Zornberg, Byler e Knudsen (2004). A Figura 5.15 também indica o índice de fluência calculado a partir de cada ensaio.

Figura 5.15 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GG-PET com carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético.

Apesar de apenas alguns pontos serem plotados na Figura 5.15, as retas de ajuste apresentadas foram calculadas com a consideração de todo o conjunto de dados de cada ensaio. Salienta-se também que a lacuna apresentada na série de dados referente ao ensaio acelerado de fluência conduzido a 43°C ocorreu devido a uma falha no registro do alongamento do corpo de prova. Contudo, os dados armazenados após a solução deste problema permitiram um ajuste satisfatório com a regressão linear proposta a partir dos dados coletados inicialmente, conforme explicitado no item 5.2.1.2.1.

A taxa de deformações por fluência é indicada pela inclinação das retas apresentadas na Figura 5.15. Percebe-se claramente que o confinamento em areia com tensão normal igual a 50 kPa foi responsável por uma redução expressiva nas deformações por fluência da GG-PET, resultando em um índice de fluência igual a 0,014. Assim, comparado ao índice de fluência do ensaio convencional de fluência (0,243) obteve-se uma redução de 94%.

O planejamento inicial dos ensaios confinados previu a realização de testes com corpos de prova confinados apenas em areia. Contudo, devido a obtenção de valores de índice de fluência expressivamente baixos nestes ensaios, procedeu-se um novo experimento com o corpo de prova confinado em solo para verificar se o mesmo comportamento seria presente em um material coesivo. O índice de fluência obtido no ensaio confinado em solo (0,059) foi maior que aqueles confinados em areia (0,014 e 0,003), porém, ainda pouco expressivo.

Esse comportamento também foi encontrado nos ensaios conduzidos em temperatura elevada. Como ilustrado na Figura 5.15, os índices de fluência calculados a partir dos resultados dos ensaios conduzidos com temperatura aproximadamente igual a 43°C foram iguais a 0,330 e 0,156, para o corpo de prova em isolamento e confinado em areia, respectivamente. Essa redução foi de quase 53%. Pode-se notar que a diminuição do índice de fluência devido ao confinamento em areia foi menor em temperatura elevada (53%) do que àquela encontrada em temperatura ambiente (94%). Isso se deve ao efeito da temperatura na fluência dos geossintéticos. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que o aumento da temperatura de ensaio causa um aumento no índice de fluência do material. Esse comportamento é ilustrado na Figura 5.16.

Figura 5.16 – Variação do índice de fluência em função da temperatura de ensaio (GG-PET).

Foi proposto um ajuste por meio de uma equação exponencial para representar os dados de ensaios não confinados apresentados na Figura 5.16. Percebe-se que os incrementos nos valores de índice de fluência devido ao aumento nas temperaturas de ensaio apresentam-se praticamente paralelos quando as condições de isolamento do corpo de prova e confinamento são consideradas. Assim, em ensaios conduzidos em temperatura elevada, o nível de confinamento aplicado pode ter sido suficiente para provocar a mesma redução no índice de fluência encontrada em temperatura ambiente. Contudo, esta suposição seria comprovada a partir da execução de novos ensaios (e.g. ensaio confinado-acelerado em temperatura igual a 60°C). Assim, recomenda-se a execução de um ensaio confinado-acelerado de fluência em temperatura igual a 60°C para a comparação com os resultados obtidos no ensaio acelerado em mesma temperatura.

As deformações por fluência obtidas nos ensaios acelerados puderam ser interpretadas como ocorridas em uma temperatura de referência (temperatura ambiente) a partir do conceito de fator de translação (a_T). Assim, a variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura a partir do valor de referência ($T_i - T_R$) pôde ser estabelecida a partir do procedimento descrito no item 4.3 e é ilustrada na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura para a GG-PET.

Verificou-se que variação entre o fator de translação e o acréscimo de temperatura obtida com corpos de prova em isolamento pôde ser representada por um polinômio de segundo grau. Dessa forma, ainda que apenas um ensaio confinado-acelerado de fluência tenha sido executado, propôs-se um polinômio de mesmo grau para a condição confinada, de maneira a manter a forma geral da curva obtida em isolamento. Os fatores de translação indicados na Figura 5.17 foram utilizados para determinar a duração dos ensaios acelerados caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente). Esses valores são indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Duração dos ensaios de fluência conduzidos com GG-PET em temperatura elevada caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).

Designação do ensaio	Temperatura de ensaio (°C)	Duração real do ensaio (h) ¹	Fator de translação	Duração fictícia do ensaio (h) ²
GG-PET-31	43,03	15,214	0,734	20,661
GG-PET-32	60,72	96,737	0,345	280,657
GG-PET-33	63,07	13,352	0,504	26,484
GG-PET-38	44,10	22,237	0,090	247,784

¹ Duração do ensaio em temperatura elevada.

² Duração do ensaio interpretada para a temperatura de referência (temperatura ambiente).

A execução de ensaios acelerados e confinado-acelerado possibilitou a construção de curvas mestras de fluência da GG-PET em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa. Estas curvas são apresentadas na Figura 5.18.

Figura 5.18 – Curvas mestras de fluência da GG-PET em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa, com corpos de prova submetidos a um carregamento aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético.

Salienta-se que a curva mestra referente aos corpos de prova em isolamento apresenta uma lacuna devido à falha na aquisição dos dados no ensaio acelerado conduzido a 43°C, conforme explicitado no item 5.2.1.2.1. Contudo, a curva mestra sugerida para esta condição pôde ser formulada com os dados obtidos nos três ensaios conduzidos com corpos de prova isolados (um convencional e dois acelerados). A curva mestra sugerida para a GG-PET submetida a um confinamento igual a 50 kPa também é apresentada na Figura 5.18. Verifica-se com clareza a diferença tanto nas deformações iniciais como nas deformações por fluência (inclinação das retas de ajuste) devido ao confinamento em areia. Apesar de curvas mestras de fluência terem sido apresentadas, sugere-se ainda a realização de ensaios adicionais em temperaturas intermediárias entre os valores empregados para a verificação dos resultados obtidos até o momento.

As deformações iniciais dos corpos de prova apresentaram um comportamento similar àquele demonstrado pelo índice de fluência em relação à variação da temperatura de ensaio e ao confinamento em areia. A Figura 5.19 compara os valores obtidos nos ensaios de fluência conduzidos com a GG-PET.

Figura 5.19 – Deformação inicial dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fluência da GG-PET, em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa.

Como esperado, o aumento na temperatura de ensaio provocou um incremento nas deformações iniciais tanto na condição confinada como nos ensaios conduzidos com corpos de prova isolados. O ensaio acelerado de fluência com temperatura igual a 60°C não seguiu esta tendência. Ressalta-se, porém, que este aspecto está intrinsecamente relacionado à velocidade de aplicação da solicitação de tração ao corpo de prova. Assim, uma vez que este procedimento é inteiramente manual no novo equipamento, existe uma grande dependência em relação ao operador do ensaio. Este aspecto precisa ser melhorado no novo equipamento de fluência em geossintéticos. Quanto ao confinamento do corpo de prova em areia, percebe-se que as deformações iniciais foram reduzidas devido à aplicação de uma tensão igual a 50 kPa. Este comportamento foi verificado nas duas temperaturas nas quais ensaios convencionais e confinados foram executados (temperatura ambiente e 43°C).

5.2.2. Geotêxtil tecido de polipropileno (GTW)

O conjunto de ensaios conduzidos para verificação do comportamento em deformação por fluência sob tração do GTW é formado por ensaios convencionais, juntamente com os três tipos de ensaios que o novo equipamento é capaz de executar. Esta série se assemelha àquela utilizada nos ensaios da GG-PET, diferindo apenas na temperatura daqueles conduzidos em temperatura elevada e no valor do carregamento empregado nos

ensaios não convencionais. Em resumo, foram realizados ensaios convencionais de fluência com o GTW, com níveis de carregamento entre 20 e 80% da resistência à tração do geossintético, seguidos por ensaios não convencionais (acelerados, confinado e confinado-acelerado) com carregamentos iguais a 30% da sua resistência à tração. Adicionalmente, um único ensaio convencional foi conduzido no sentido transversal de fabricação do geossintético, com carregamento igual a 67% da resistência à tração.

5.2.2.1. Ensaios convencionais de fluência

A caracterização da fluência do GTW foi realizada a partir de uma série de ensaios convencionais com nível de carregamento entre 20 e 80% da resistência à tração deste material no sentido longitudinal de fabricação. Um ensaio adicional foi conduzido com carregamento igual a 67% da resistência à tração no sentido transversal de fabricação. Este ensaio foi realizado com o intuito de ilustrar as fases da fluência dos geossintéticos, conforme apresentado no item 2.1. A duração dos ensaios convencionais foi igual a 10 horas, exceto por aqueles onde a ruptura do corpo de prova aconteceu em menor tempo. A Figura 5.20 apresenta os resultados obtidos nos ensaios convencionais de fluência executados com o GTW.

Figura 5.20 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios convencionais conduzidos com GTW.

Conforme explicitado no item 2.1, as duas primeiras fases da fluência dos geossintéticos se apresentam lineares quando o tempo é representado em escala logarítmica.

Os resultados dos ensaios convencionais de fluência com o GTW indicaram, portanto, a ocorrência da terceira fase da fluência de geossintéticos, que leva à ruptura do corpo de prova. De fato, a ruptura dos corpos de prova ocorreu em dois ensaios convencionais antes de 10 horas (sentido longitudinal com 80% e sentido transversal com 67% da resistência à tração). O corpo de prova submetido ao carregamento igual a 20% da resistência à tração não atingiu a fluência terciária e apresentou uma curva de fluência linear na representação mostrada na Figura 5.20.

As deformações iniciais dos corpos de prova foram proporcionais à solicitação de tração empregada. A representação gráfica das deformações por fluência em função do logaritmo da razão entre t e t_0 proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004), por sua vez, foi prejudicada devido à curvatura encontrada nas curvas de fluência. Contudo, os valores de índice de fluência foram calculados a partir do trecho linear referente a cada ensaio convencional. A Figura 5.21 apresenta as variações das deformações iniciais dos corpos de prova e do índice de fluência em função do nível de carregamento obtidas nos ensaios convencionais de fluência conduzidos com o GTW.

Figura 5.21 – Deformação inicial (a) e índice de fluência (b) obtidos nos ensaios convencionais de fluência em função do nível de carregamento aplicado (ensaios com GTW).

O comportamento em deformação por fluência sob tração do GTW foi avaliado a partir de ensaios onde os corpos de prova foram submetidos a um carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético. De forma similar aos ensaios conduzidos com a GG-PET, este nível de carregamento foi escolhido por ser compatível com a atual configuração do novo equipamento e encontrar-se entre outros dois valores também utilizados. A solicitação de tração desejada foi atingida a partir da utilização de 51,5 kgf em pesos livres em cada extremidade do novo equipamento. Isto corresponde a um carregamento aproximadamente igual a 3,05 kN a ser mensurado nas células de carga.

Adicionalmente, caso ocorresse uma variação expressiva no carregamento que atinge o corpo de prova, os resultados dos ensaios conduzidos no novo equipamento poderiam ser comparados àqueles obtidos nos ensaios convencionais conduzidos com carregamentos diferentes (e.g. 20% e 40% da resistência à tração).

5.2.2.2. Ensaios não convencionais de fluência

A série de ensaios não convencionais de fluência conduzidos com o GTW é formada por cinco ensaios e abrange todos os tipos de ensaios que podem ser conduzidos com o novo equipamento de fluência em geossintéticos. Três ensaios acelerados de fluência foram conduzidos em duas temperaturas diferentes (38 e 62°C), com repetição do ensaio conduzido a 62°C. Em seguida, um ensaio confinado foi realizado, em temperatura ambiente, com o corpo de prova confinado em areia e tensão normal igual a 50 kPa. Esta série de ensaios foi finalizada com um ensaio confinado-acelerado executado com areia como meio confinante e em temperatura de cerca de 38°C. A tensão normal aplicada neste último ensaio também foi igual a 50 kPa.

5.2.2.2.1. Ensaios acelerados de fluência

Três ensaios acelerados de fluência foram conduzidos com o GTW: um em temperatura igual a 38°C e dois em temperatura igual a 62°C. Houve uma falha na execução do primeiro ensaio com temperatura igual a 62°C, interrompendo-o com cerca de cinco horas de duração. Assim, optou-se por repetir as mesmas condições deste ensaio em um segundo procedimento. A Figura 5.22 apresenta as curvas de fluência obtidas com o GTW submetido a ensaios acelerados.

As curvas de fluência obtidas nos ensaios acelerados apresentaram um aspecto similar àquelas encontradas a partir dos ensaios convencionais. Verifica-se claramente a ocorrência da fluência terciária (trecho não linear), principalmente nas curvas obtidas a partir dos ensaios acelerados conduzidos a 62°C. Apesar de terem duração diferente, os dois ensaios acelerados realizados nesta temperatura apresentaram curvas de fluência bastante similares, o que indica uma boa repetibilidade dos ensaios conduzidos no novo equipamento.

Figura 5.22 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GTW em duas temperaturas (38 e 62°C).

Os resultados dos ensaios acelerados apresentaram coerência em relação às deformações iniciais e aos valores de índice de fluência. Conforme esperado, ambos os parâmetros foram aumentados devido ao aumento na temperatura de ensaio. Salienta-se que o índice de fluência foi calculado a partir do trecho linear no início de cada curva. As deformação iniciais foram iguais a 2,74%, 7,26% e 7,09% nos ensaios conduzidos a 43 e 62°C (CP-1 e CP-2), respectivamente. Os índices de fluência calculados a partir dos trechos lineares de cada curva de fluência foram iguais a 2,140, 5,693 e 4,205, respectivamente para os ensaios conduzidos a 43 e 62°C (CP-1 e CP-2).

5.2.2.2.2. Ensaio confinado de fluência

Um único ensaio confinado de fluência foi conduzido com o GTW. Nele, o corpo de prova foi confinado em areia e submetido a uma tensão normal igual a 50 kPa durante cerca de 168 horas. A Figura 5.23 apresenta os resultados obtidos neste procedimento.

Figura 5.23 – Curva de fluência e leituras das células de carga resultantes do ensaio confinado de fluência conduzido com GTW em temperaturas ambiente.

O carregamento médio resultante no ensaio confinado com o GTW foi igual a 27,3% da resistência à tração do geossintético. Percebe-se que ambas as células de carga registraram os valores da sollicitação de tração de forma apropriada. O comportamento em deformação por fluência sob tração na condição de confinamento em areia se assemelha àquele obtido nos ensaios convencionais, com a obtenção de uma curva de fluência não linear na escala logarítmica do tempo. O índice de fluência computado a partir do trecho linear desta curva foi igual a 0,902 e a deformação inicial do corpo de prova igual a 2,580%.

5.2.2.2.3. Ensaio confinado-acelerado de fluência

Apenas um ensaio confinado-acelerado de fluência foi realizado com o GTW durante esta pesquisa. O corpo de prova foi submetido ao confinamento em areia, com tensão normal igual a 50 kPa, juntamente com a elevação da temperatura para 38°C. A Figura 5.24 ilustra os resultados obtidos neste procedimento.

Figura 5.24 – Curva de fluência e leituras das células de carga resultantes do ensaio confinado-acelerado de fluência conduzido com GTW em temperatura igual a 38°C.

Verificou-se que a aplicação do carregamento foi apropriada neste ensaio, elevando a solicitação de tração de forma suave e mantendo-a constante durante a fluência do geossintético. O valor médio obtido nesse período é igual a 27,4% da resistência à tração do material. Adicionalmente, a Figura 5.24 mostra que as deformações por fluência do GTW ocorreram de maneira idêntica àsquelas obtidas nos ensaios de fluência apresentados anteriormente. Assim, é possível perceber a ocorrência da fluência terciária. O cálculo do índice de fluência a partir do trecho linear da curva de fluência resultou em 1,014, com deformação inicial igual a 2,067%.

5.2.2.3. Análise dos resultados – GTW

A série de ensaios de fluência executada com o GTW no novo equipamento foi conduzida com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético. Assim, os resultados desses ensaios foram comparados com aquele obtido no ensaio convencional com um nível de carregamento similar. A Figura 5.25 apresenta as curvas de fluência obtidas nesses ensaios. Contudo, optou-se por reapresentá-las devido a diferença nas deformações obtidas no ensaio acelerado com temperatura igual a 62°C. Assim, a Figura 5.25b apresenta o mesmo conjunto de dados, porém em uma escala vertical diferente com o propósito de destacar as diferenças entres os resultados.

Figura 5.25 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios de fluência conduzidos com GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético: a) Escala vertical para visualização de todos os dados; b) Escala vertical ampliada.

Todos os corpos de prova submetidos aos ensaios de fluência com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do material apresentaram curvas de fluência não lineares na representação semi-logarítmica. Verificou-se uma dificuldade em manter um padrão na aplicação da solicitação de tração. Isso pode ser percebido na Figura 5.25 a partir da verificação do tempo necessário para que os corpos de prova atingissem as deformações iniciais e as deformações por fluência começassem a se desenvolver. Percebe-se que, tomando o ensaio convencional como padrão para a aplicação do carregamento, apenas o ensaio acelerado com temperatura igual a 38°C teve o carregamento aplicado num tempo semelhante. Apesar de este aspecto ser altamente importante para a definição das deformações iniciais, ele não afeta o estudo das deformações por fluência neste caso. Isto pode ser assumido pois os tempos de aplicação do carregamento ainda estão numa mesma ordem de grandeza, variando apenas alguns segundos entre os ensaios. Dessa forma, a representação gráfica das deformações por fluência proposta por Zornberg, Byler e Knudsen (2004) contribui para a visualização dos efeitos do confinamento em areia e da temperatura na fluência do GTW. Essa representação é mostrada na Figura 5.26.

Verificou-se que a representação gráfica das deformações por fluência dos corpos de prova sugerida por Zornberg, Byler e Knudsen (2004) não foi adequada para ilustrar os resultados dos ensaios de fluência conduzidos com o GTW. A evolução das deformações por fluência em função do logaritmo da razão entre t e t_0 mostrou-se curvilínea. Ainda assim, utilizou-se esta sugestão para estabelecer o índice de fluência de cada ensaio a partir do trecho inicial e linear de cada curva. Estes valores são destacados na Figura 5.26b, juntamente com as linhas tracejadas que os representam.

Figura 5.26 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético: a) Escala vertical para visualização de todos os dados; b) Escala vertical ampliada.

O efeito do confinamento em areia, com tensão normal igual a 50 kPa, nas deformações por fluência do GTW é apresentado na Figura 5.27, na qual as curvas de fluência são agrupadas segundo a temperatura de ensaio. Optou-se, portanto, por avaliar o efeito do confinamento em relação a cada temperatura de ensaio empregada. Salienta-se que a escala dos eixos das ordenadas são diferentes na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Efeito do confinamento em areia nas deformações por fluência do GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético: a) Ensaio em temperatura ambiente; b) Ensaio em temperatura elevada igual a 38°C .

A partir da Figura 5.27a, percebe-se uma redução nas deformações por fluência do geossintético devido ao confinamento em areia em temperatura ambiente. Por outro lado, as deformações por fluência em temperatura elevada (38°C) não apresentaram esse comportamento tão claramente. Apesar da diferença nos valores de índice de fluência nos dois ensaios apresentados na Figura 5.27b, esse aspecto reflete apenas o trecho inicial das curvas. Verificou-se que, após $\text{log}(t/t_0)$ aproximadamente igual a 1,7, as duas curvas da Figura 5.27b se tornam praticamente paralelas, indicando uma similaridade no desenvolvimento de novas deformações por fluência. Este comportamento poderia ser explicado caso a velocidade de aplicação do carregamento fosse diferente nos dois ensaios. Contudo, a Figura 5.28 ilustra uma diferença mínima na trajetória de aplicação da solicitação de tração empregada nestes dois ensaios. Assim, não foi possível determinar com clareza a real influência do confinamento em areia na fluência do GTW. Isto concorda com a literatura técnica, que

comumente afirma que a fluência de geotêxteis tecidos têm pouca ou nenhuma dependência em relação às tensões confinantes que atuam sobre o corpo de prova. Sugere-se, portanto, a realização de ensaios adicionais para a verificação do comportamento em fluência do GTW em temperatura igual a 62°C, ou em valores intermediários de temperatura e assim, poder definir qual a influência do confinamento dos corpos de prova.

Figura 5.28 – Aplicação da solicitação de tração nos ensaios acelerado (38°C) e acelerado-confinado com o GTW.

O efeito da temperatura de ensaio nas deformações por fluência do GTW pôde ser completamente percebido com os ensaios conduzidos nesta pesquisa. A Figura 5.29 ilustra a variação do índice de fluência em função da temperatura. Verificou-se um incremento praticamente exponencial do índice de fluência devido ao aumento da temperatura de ensaio. Assim, foi indicado um ajuste exponencial aos dados referentes aos ensaios com corpos de prova em isolamento. O efeito da temperatura de ensaio pôde ser percebido em ambas as condições de confinamento dos corpos de prova. Contudo, verifica-se que este efeito foi mais acentuado na condição não confinada. Um segundo ensaio confinado-acelerado permitiria a proposição de um ajuste para a condição confinada.

A interpretação dos ensaios conduzidos em temperaturas elevadas permitiu a elaboração da Figura 5.30, que apresenta a relação entre o fator de translação e o acréscimo de temperatura. Salienta-se que o procedimento descrito no 4.3 foi empregado para a obtenção dos pares de valores fator de translação (a_T) e acréscimo de temperatura em relação ao valor de referência ($T_i - T_R$).

Figura 5.29 – Efeito da temperatura de ensaio no índice de fluência do GTW com carregamento aproximadamente igual a 30% da resistência à tração do geossintético.

Figura 5.30 – Variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura para a GTW.

A variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura obtida com corpos de prova em isolamento foi representada pelo inverso de uma função linear. Similarmente aos resultados obtidos com a GG-PET, apenas um ensaio confinado-acelerado foi conduzido com o GTW. Assim, optou-se por estabelecer um ajuste com o mesmo tipo de equação, procurando-se os parâmetros manualmente. A Tabela 5.2 apresenta os fatores de translação empregados na Figura 5.17, juntamente com a duração dos ensaios acelerados caso

fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).

Tabela 5.2 – Duração dos ensaios de fluência conduzidos com GTW em temperatura elevada caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).

Designação do ensaio	Temperatura de ensaio (°C)	Duração real do ensaio (h) ¹	Fator de translação	Duração fictícia do ensaio (h) ²
GTW-9	38,21	25,229	0,569	44,363
GTW-10	61,59	4,990	0,214	23,343
GTW-11	62,36	18,620	0,289	64,336
GTW-13	38,65	143,007	0,889	160,764

¹ Duração do ensaio em temperatura elevada.

² Duração do ensaio interpretada para a temperatura de referência (temperatura ambiente).

A realização de ensaios de fluência em temperaturas diferentes possibilitou a elaboração das curvas mestras de fluência para os corpos de prova em isolamento e em confinamento em areia (tensão normal igual a 50 kPa), apresentadas na Figura 5.31.

Figura 5.31 – Curvas mestras de fluência do GTW em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa, com corpos de prova submetidos a um carregamento igual a 30% da resistência à tração do geossintético.

A comparação entre as curvas mestras obtidas a partir dos corpos de prova em isolamento e confinados em areia indicou uma proximidade nas deformações do geossintético na fase inicial das curvas, correspondente aos ensaios em temperatura ambiente. As duas retas apresentadas na Figura 5.31 foram obtidas a partir da regressão logarítmica dos dados no trecho linear de cada curva mestra. A diferença na inclinação dessas retas é de cerca de 10%.

Uma vez que o coeficiente de variação das deformações na ruptura obtidas nos ensaios de tração com material é da ordem de 11% (Tabela 4.1), esse comportamento pode ser devido a variabilidade do próprio material. Assim, é razoável considerar que o comportamento em deformação por fluência sob tração do GTW é pouco afetado pelo confinamento em areia com tensão normal igual a 50 kPa.

Por outro lado, percebe-se uma mudança na inclinação das curvas, sugerindo a ocorrência da fase terciária da fluência do GTW. Esta fase é caracterizada pelo aumento da taxa de fluência e pode levar o corpo de prova à ruptura. Verificou-se que a fase terciária da fluência do GTW em confinamento em areia iniciou-se antes daquela encontrada em isolamento. Isso leva a conclusão de que o confinamento, na verdade, pode levar o geossintético a uma ruptura mais precoce. Percebe-se, portanto, uma contradição entre os resultados, o que dificulta a definição da dependência que o comportamento em fluência do GTW apresenta em relação ao confinamento. Assim, sugere-se a execução de ensaios complementares para definir com exatidão a influência do confinamento em areia no comportamento em fluência do GTW.

As deformações iniciais dos corpos de prova possuem caráter secundário neste estudo. Contudo, optou-se por verificar os valores atingidos nos ensaios conduzidos com o GTW. A Figura 5.32 apresenta os valores encontrados em cada ensaio de fluência conduzido com o GTW, submetido a um carregamento aproximadamente igual 30% da resistência à tração do material.

Figura 5.32 – Deformação inicial obtida em cada ensaio de fluência conduzido com o GTW, submetido a um carregamento igual 30% da resistência à tração do material.

Apesar de não ter sido possível definir uma relação precisa entre os valores, percebe-se que houve uma redução das deformações iniciais com a aplicação do confinamento em areia e com a diminuição da temperatura. Destaca-se, porém, o ensaio com temperatura igual a 38°C como exceção a esse comportamento, uma vez que as deformações iniciais mensuradas nesse ensaio são menores que aquelas calculadas a partir dos ensaios em temperatura ambiente. Isso provavelmente ocorreu devido à diferença na velocidade de aplicação do carregamento e destaca a importância de elaborar um novo sistema de aplicação da solicitação de tração. Esse sistema deve ser implementado ao novo equipamento de fluência em geossintéticos.

5.2.3. Geotêxtil não tecido de poliéster, com filamentos contínuos (GTNcont)

Similarmente aos demais geossintéticos utilizados no estudo do comportamento em deformação por fluência sob tração, o GTNcont foi submetido aos quatro tipos de ensaio de fluência conduzidos nesta pesquisa. Inicialmente, ensaios convencionais de fluência foram conduzidos com o GTNcont, com níveis de carregamento entre 20 e 60% da resistência à tração do geossintético. Em seguida, foram realizados ensaios acelerados, em temperaturas iguais a 38 e 58°C, e confinados, com tensão normal igual a 50 kPa. Por fim, dois ensaios confinado-acelerados foram executados a partir da combinação desses dois parâmetros (temperatura igual a 38 e 58°C e tensão normal igual a 50 kPa). Todos os ensaios não convencionais foram conduzidos com carregamento igual a 60% da resistência à tração do material. Assim, esse nível de carregamento foi escolhido para avaliar o comportamento em fluência do GTNcont.

5.2.3.1. Ensaios convencionais de fluência

Como forma de caracterização da fluência do GTNcont através da prática atual, cinco ensaios convencionais foram conduzidos com carregamento entre 20 e 60% da resistência do geossintético. Cavaletes metálicos e pesos livres foram empregados nestes ensaios, cujos carregamentos foram mantidos por, no mínimo, 1.000 horas. Os resultados dos ensaios convencionais de fluência com o GTNcont são apresentados na Figura 5.33. Nela, são também ilustradas as retas computadas a partir da regressão logarítmica dos dados.

Figura 5.33 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios convencionais conduzidos com GTNcont.

As deformações iniciais dos corpos de prova apresentaram valores crescentes com o aumento do nível de carregamento empregado no ensaio. Este comportamento não foi completamente verificado em relação às deformações por fluência. Os ensaios conduzidos com solicitação de tração igual a 30 e 50% da resistência à tração do geossintético resultaram em valores de índice de fluência menores que aqueles obtidos nos ensaios com carregamento iguais a 20 e 40%, respectivamente. A Figura 5.34 apresenta a variação das deformações iniciais e do índice de fluência em função do nível de carregamento empregado em cada ensaio.

Figura 5.34 – Deformação inicial (a) e índice de fluência (b) obtidos nos ensaios convencionais de fluência em função do nível de carregamento aplicado (ensaio com GTNcont).

Pode-se destacar a variabilidade do material como causa para a obtenção dos valores de índice de fluência nos ensaios conduzidos com carregamento igual a 30 e 50% da

resistência à tração do geossintético. Adicionalmente, salienta-se que a aplicação do carregamento nestes ensaios convencionais de fluência foi realizada manualmente, levando a uma dependência maior em relação ao operador. Ainda assim, a variação do índice de fluência com o nível de carregamento apresentou um ajuste linear satisfatório e mostrou-se proporcional a este parâmetro. Caso os dois pontos em questão sejam desconsiderados (30 e 50% da resistência à tração), os coeficientes angular e linear da equação obtida por regressão linear seriam iguais a 0,0107 e 0,8393, respectivamente ($y = 0,0107x + 0,8393$). Isso representa uma diferença de cerca de 10% no coeficiente angular e de 15% no coeficiente linear. Uma vez que a resistência à tração e a determinação da gramatura e espessura nominal do material apresentaram coeficientes de variação da ordem de 10%, optou-se por não descartar nenhum resultado.

Os demais ensaios de fluência com o GTNcont foram conduzidos com nível de carregamento igual a 60% da resistência à tração do geossintético. Esse valor corresponde a uma solicitação de tração aproximadamente igual 1,66 kN e foi atingido a partir da utilização de 27 kgf em pesos livres no novo equipamento de ensaios de fluência em geossintéticos. Devido à aplicação de um carregamento menor que aqueles empregados nos ensaios conduzidos com a GG-PET e o GTW, previu-se que as perdas por atrito entre a geomembrana e os corpos de prova seriam mais influentes. Por este motivo adotou-se o maior nível de carregamento empregado nos ensaios convencionais (60%) como padrão para a execução dos ensaios não convencionais no novo equipamento.

5.2.3.2. Ensaios não convencionais de fluência

O conjunto de ensaios não convencionais de fluência conduzidos com o GTNcont é formado por um ensaio confinado, dois acelerados e dois confinado-acelerados. Os ensaios que utilizaram a condição confinada dos corpos de prova foram conduzidos com tensão normal igual a 50 kPa. Aqueles que empregaram a elevação da temperatura para aceleração das deformações por fluência foram executados em temperaturas iguais a 38 e 58°C. Esta série de ensaios não contou com nenhum ensaio repetido. Assim, devido à realização de três ensaios (temperatura ambiente, 38 e 58°C) em cada condição de confinamento (corpos de prova em isolamento e sob tensão normal igual a 50 kPa), este conjunto de ensaios pode ser considerado o mais completo entre aqueles conduzidos nesta pesquisa.

5.2.3.2.1. Ensaio acelerados de fluência

Foram realizados dois ensaios acelerados de fluência com o GTNcont. As temperaturas empregadas nesses ensaios foram 38 e 58°C. As curvas de fluência obtidas nestes ensaios são apresentadas na Figura 5.35.

Figura 5.35 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios acelerados de fluência conduzidos com GTNcont em duas temperaturas (38 e 58°C).

A curva de fluência obtida no ensaio acelerado com temperatura igual a 58°C apresentou um trecho constante entre 4 e 12 horas de ensaio. Isto pode ter sido causado por alguma falha nas leituras dos deslocamentos dos elementos metálicos ligados aos fios inextensíveis. Ainda assim, percebe-se a ocorrência da fluência terciária imediatamente após esse trecho, indicada por um aumento da taxa de deformação por fluência. Por outro lado, o ensaio acelerado com temperatura igual a 38°C resultou em uma curva de fluência linear em relação ao logaritmo do tempo, indicando que o material não atingiu a fluência terciária. Esse comportamento é esperado, uma vez que ocorre aceleração da fluência dos geossintéticos com o aumento da temperatura de ensaio. Os índices de fluência obtidos nos ensaios acelerados conduzidos a 38 e 58°C foram iguais a 2,411 e 3,324, respectivamente, com deformações iniciais iguais a 26,94% e 32,62%. Cabe ressaltar que o índice de fluência do ensaio acelerado realizado com temperatura igual a 58°C foi computado com a consideração do trecho linear da curva de fluência referente a este ensaio.

5.2.3.2.2. Ensaio confinado de fluência

O GTNcont foi submetido a um ensaio confinado de fluência, no qual o corpo de prova estava sujeito a uma tensão normal igual a 50 kPa. O carregamento foi mantido por cerca de 36 horas, como ilustrado na Figura 5.36, juntamente com a curva de fluência obtida.

Figura 5.36 – Curva de fluência e trajetória de carregamento do corpo de prova resultantes do ensaio confinado de fluência conduzido com GTNcont em temperaturas ambiente.

Optou-se por apresentar a trajetória de aplicação da solicitação de tração para destacar que o corpo de prova não foi submetido ao carregamento de maneira suave e constante. Contudo, percebe-se que isto não implicou em prejuízos ao resultado do ensaio. A curva de fluência obtida apresentou-se linear, com índice de fluência igual a 0,190 e deformação inicial igual a 6,83%.

A solicitação de tração média aplicada ao corpo de prova no ensaio confinado com o GTNcont foi igual a 50,4% da resistência à tração do geossintético. Apesar da solicitação desejada não ter sido atingida, a análise dos resultados não foi comprometida devido à realização de ensaios convencionais em vários níveis de solicitação de tração. Assim, os resultados obtidos na condição confinada dos corpos de prova puderam ser comparados aos ensaios convencionais conduzidos com carregamento igual a 50% da resistência à tração, como será apresentado no item 5.2.3.3.

5.2.3.2.3. Ensaios confinado-acelerados de fluência

Diferentemente dos outros geossintéticos apresentados anteriormente, o GTNcont foi submetido a dois ensaios confinado-acelerados de fluência. Eles foram executados com corpos de prova submetidos a uma tensão normal igual a 50 kPa e temperaturas iguais a 38 e 58°C. A Figura 5.37 apresenta as curvas de fluência obtidas nesses procedimentos, juntamente com linhas tracejadas que representam o ajuste obtido por regressão logarítmica dos dados.

Figura 5.37 – Curva de fluência e trajetória de carregamento do corpo de prova resultantes do ensaio confinado-acelerado de fluência conduzido com GTNcont em temperaturas iguais a 38 e 58°C.

O ensaio confinado-acelerado de fluência executado com o GTNcont em temperatura igual a 38°C apresentou descontinuidades nas deformações. Contudo, a regressão logarítmica dos dados deste ensaio resultou em um ajuste satisfatório. Estas descontinuidades não foram percebidas no ensaio confinado-acelerado em temperatura igual a 58°C, cuja curva de fluência apresentou um aspecto mais suave e contínuo. O índice de fluência e as deformações iniciais obtidos nesses ensaios foram crescentes com a temperatura. O ensaio conduzido a 38°C resultou em índice de fluência igual a 0,780 e deformação inicial igual a 6,49%. O ensaio realizado com temperatura igual a 58°C resultou em índice de fluência e deformação inicial iguais a 1,424 e 8,57%, respectivamente.

De maneira similar ao ensaio confinado de fluência conduzido com o GTNcont, o nível de carregamento atingido nos ensaios confinado-acelerados foram menores que aquele desejado. Foram alcançados valores iguais a 51,2 e 549,6% da resistência à tração do geossintético nos ensaios conduzidos a 38 e 58°C, respectivamente.

5.2.3.3. Análise dos resultados – GTNcont

Cinco ensaios foram realizados com o GTNcont no novo equipamento de fluência em geossintéticos. O carregamento desejado neste conjunto de ensaios foi 60% da resistência à tração do geossintético. Assim, os resultados seriam comparados àqueles obtidos no ensaio convencional com o mesmo nível de solicitação de tração. Apesar de este valor ter sido atingido nos ensaios acelerados, isso não foi percebido naqueles onde o corpo de prova foi submetido à condição confinada. Estes ensaios foram conduzidos com um valor aproximadamente igual a 50% da resistência à tração do geossintético. Esta diferença foi provocada pelo atrito entre os corpos de prova e as geomembranas utilizadas na montagem dos ensaios, conforme descrito no item 3.3.1.1.

Apesar da diferença entre a solicitação de tração aplicada nas condições de isolamento dos corpos de prova (ensaios convencionais e acelerados) em relação àquela empregada nos ensaios confinados e confinados-acelerados, foi possível verificar a influência do confinamento em areia na fluência do GTNcont. A comparação dos resultados do ensaio confinado com o ensaio convencional com 50% da resistência à tração é um indicativo do efeito do confinamento em areia na fluência do material. Assim, optou-se por incluir este ensaio na análise dos resultados, conforme apresentado na Figura 5.38.

Figura 5.38 – Curvas de fluência obtidas a partir dos ensaios de fluência conduzidos com GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.

A análise da Figura 5.38 indica claramente a diferença entre as deformações iniciais ocorridas em corpos de prova em isolamento e aqueles confinados em areia. As deformações iniciais obtidas nos ensaios confinado e confinado-acelerado são menores que 10%, com valores entre 6,4 e 8,6%. Por outro lado, os ensaios com corpos de prova isolados (convencional e acelerados) resultaram em deformações iniciais entre 30 e 38%. É uma redução significativa de aproximadamente 75% nas deformações iniciais dos GTNcont devido ao confinamento em areia.

Apesar de visível na Figura 5.38, a variação da inclinação das curvas de fluência não está clara devido a escala do eixo das ordenadas. Essa representação foi escolhida para permitir a apresentação de todo o conjunto de ensaios de interesse. Por outro lado, a apresentação apenas das deformações por fluência permite verificar a influência da temperatura e do confinamento em areia na fluência do geossintético com maior clareza. Essa representação é mostrada na Figura 5.39.

Figura 5.39 – Deformações por fluência obtidas a partir dos ensaios conduzidos com GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.

Os ensaios analisados foram representados segundo a sugestão de Zornberg, Byler e Knudsen (2004). Apenas as deformações por fluência obtidas no ensaio acelerado em temperatura igual a 58°C não se apresentaram lineares nesta representação. Ainda assim, foi proposto um valor de índice de fluência para este ensaio, computado a partir do trecho linear inicial da curva de deformação por fluência *versus* $\log(t/t_0)$. A comparação entre os valores de T_α obtidos em ensaios conduzidos com a mesma temperatura indica a influência do confinamento em areia na fluência do GTNcont (Figura 5.40).

Figura 5.40 – Efeito do confinamento em areia nas deformações por fluência do GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.

Apesar da diferença nos valores da solicitação de tração empregados em cada ensaio, verificou-se uma redução expressiva no índice de fluência do GTNcont devido ao confinamento em areia com tensão normal igual a 50 kPa. Essa diminuição chegou a atingir aproximadamente 85% em temperatura ambiente. Valores menos expressivos foram alcançados em temperatura elevada (67 e 57% nos ensaios em temperaturas iguais a 38 e 58°C, respectivamente). Esse comportamento é esperado, pois as deformações por fluência de geotêxteis não tecidos são fortemente relacionadas ao confinamento do material.

Ao contrário das séries de ensaios conduzidas com os outros geossintéticos nesta pesquisa, a realização de dois ensaios confinado-acelerados de fluência permitiu estabelecer a relação entre o índice de fluência e a temperatura de ensaio na condição confinada e em isolamento. A Figura 5.41 ilustra esse efeito. Verificou-se uma variação linear do índice de fluência do GTNcont com a temperatura de ensaio. Esse comportamento foi percebido em ambas as condições de confinamento dos corpos de prova (isolamento e submetido a tensão normal igual a 50 kPa). Contudo, a condição de isolamento dos corpos de prova levou a um incremento mais rápido do índice de fluência devido ao aumento na temperatura. Isso pode ser notado a partir dos valores dos coeficientes angulares das retas ajustadas por regressão linear ilustradas na Figura 5.41. O referido coeficiente angular foi igual a 0,051 nos ensaios conduzidos com corpos de prova em isolamento e 0,037 naqueles onde os corpos de prova foram confinados em areia. Este fato é mais um indicativo da redução que o confinamento em areia produziu nas deformações por fluência do GTNcont.

Figura 5.41 – Efeito da temperatura de ensaio no índice de fluência do GTNcont com carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.

A Figura 5.42 apresenta a variação do fator de translação em função da diferença entre a temperatura de ensaio e a temperatura de referência (temperatura ambiente). Essa relação foi obtida por meio da interpretação dos ensaios acelerados e confinado-acelerados de fluência conduzidos com o GTNcont. O procedimento descrito no item 4.3 foi usado para a obtenção desses valores.

Figura 5.42 – Variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura para a GTNcont.

Similarmente ao GTW, a variação do fator de translação em função do acréscimo de temperatura foi representada pelo inverso de uma função linear. O GTNcont foi o único material submetido a dois ensaios confinado-acelerados de fluência. Assim, foi possível

verificar um mesmo tipo de ajuste para os corpos de prova em isolamento e em condição confinada. A Tabela 5.3 apresenta os fatores de translação obtidos a partir dos ensaios em temperatura elevada com o GTNcont, juntamente com a duração dos ensaios acelerados caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).

Tabela 5.3 – Duração dos ensaios de fluência conduzidos com GTNcont em temperatura elevada caso fossem realizados na temperatura de referência (temperatura ambiente).

Designação do ensaio	Temperatura de ensaio (°C)	Duração real do ensaio (h) ¹	Fator de translação	Duração fictícia do ensaio (h) ²
GTNcont-6	38,54	90,238	0,603	149,631
GTNcont-7	58,28	165,016	0,437	377,244
GTNcont-9	38,21	206,029	0,244	845,803
GTNcont-10	57,29	15,586	0,134	116,682

¹ Duração do ensaio em temperatura elevado.

² Duração do ensaio interpretada para a temperatura de referência (temperatura ambiente).

Os ensaios de fluência conduzidos em temperatura elevada permitiram construir curvas mestras de fluência para o GTNcont com o material em isolamento e sob aplicação de uma tensão normal igual a 50 kPa. A Figura 5.43 apresenta as curvas mestras de fluência do GTNcont obtidas nesta pesquisa.

Figura 5.43 – Curvas mestras de fluência do GTNcont em condição de isolamento e em confinamento em areia com tensão normal igual 50 kPa, com corpos de prova submetidos a um carregamento entre 50 e 60% da resistência à tração do geossintético.

A comparação das curvas mestras obtidas na série de ensaios de fluência conduzida como GTNcont ilustra com clareza o efeito do confinamento em areia na fluência deste geossintético. A inclinação das retas de ajuste apresentadas na Figura 5.43 foi reduzida em cerca de 86% quando o corpo de prova é sujeito a uma tensão normal igual a 50 kPa. Adicionalmente, as deformações iniciais passaram de 36,8% para 6,7% com a aplicação desse nível de tensão, o que representa uma diminuição de quase 82%. Outro aspecto que pode ser destacado é a ocorrência da fluência terciária na condição não confinada. Isso aponta que o material estaria prestes a sofrer uma ruptura após aproximadamente 10^{13} horas. Por outro lado, este comportamento não foi percebido quando os corpos de prova foram submetidos ao confinamento em areia. Isso implica que o geossintético ainda não está próximo da ruptura na condição confinada até os valores de tempo atingidos.

5.3. Ensaio para avaliação do comportamento na ruptura por fluência sob tração

O comportamento na ruptura por fluência sob tração de dois geossintéticos (GG-PET e GG-PP) são apresentados neste item. Estes dois materiais foram submetidos a ensaios de ruptura por fluência em temperatura ambiente, com corpos de prova em isolamento e submetidos a uma tensão normal igual a 50 kPa. Primeiramente, os resultados obtidos nos ensaios conduzidos com a GG-PET são mostrados e discutidos. Em seguida, são apresentados aqueles obtidos a partir dos ensaios com a GG-PP.

5.3.1. Geogrelha de poliéster (GG-PET)

A GG-PET foi submetida a ensaios de ruptura por fluência com corpos de prova em isolamento e em condições confinadas. Primeiramente, corpos de prova em isolamento foram empregados em ensaios convencionais, com nível de carregamento entre 85 e 97,5% da resistência à tração do geossintético. Um mínimo de três ensaios foi executado em cada nível de solicitação de tração. Os corpos de prova utilizados nos ensaios com a GG-PET apresentaram rupturas bruscas, sem a visualização da fluência terciária. A Figura 5.44 exemplifica esse comportamento (curvas de fluência obtidas com os três corpos de prova submetidos a 85% da resistência à tração do geossintético em condição de isolamento).

Figura 5.44 – Curvas de fluência da GG-PET obtidas com corpos de prova em isolamento e nível de carregamento igual a 85%.

Como pode ser observado na Figura 5.44, as curvas de fluência obtidas nestes ensaios apresentaram-se bastante similares. Tanto as deformações iniciais como os valores de índice de fluência calculados a partir destes resultados são próximos entre si. Esse comportamento foi percebido em todos os ensaios convencionais de ruptura por fluência da GG-PET, com grande similaridade entre curvas de fluência obtidas num mesmo nível de solicitação de tração. Ainda assim, os valores de tempo para ruptura por fluência apresentaram variação. Por este motivo, optou-se por realizar pelo menos três ensaios em cada nível de carregamento, como citado anteriormente. O tempo de ruptura em cada nível de carregamento foi considerado igual à média aritmética dos valores medidos em cada corpo de prova. Salienta-se que os ensaios onde houve uma discrepância excessiva nos valores de tempo de ruptura por fluência foram descartados. A Tabela 5.4 apresenta os valores encontrados em cada ensaio, juntamente com o valor médio computado e as deformações do corpo de prova no momento da ruptura.

Os resultados desta série de ensaios foram utilizados para elaborar a curva de ruptura por fluência da GG-PET em condição de isolamento dos corpos de prova (Figura 5.45). Salienta-se que são apresentados os pontos referentes aos valores médios de tempo de ruptura por fluência e os demais pontos considerados no cálculo destes valores.

Tabela 5.4 – Tempos de ruptura por fluência obtidos nos ensaios convencionais conduzidos com GG-PET.

Designação do ensaio	Descrição do ensaio	Tempo para ruptura por fluência (h)	Tempo médio para ruptura por fluência (h)	Deformação na ruptura (%)
GG-PET-11	F _{rup} 85% - CP 1	1,089		11,209
GG-PET-12	F _{rup} 85% - CP 2	0,994	1,137	11,153
GG-PET-13	F _{rup} 85% - CP 3	1,329		11,015
GG-PET-14	F _{rup} 87,5% - CP 1	0,562		11,409
GG-PET-15	F _{rup} 87,5% - CP 2 ¹	0,297		11,223
GG-PET-16	F _{rup} 87,5% - CP 3	0,524	0,591	11,126
GG-PET-17	F _{rup} 87,5% - CP 4	0,660		11,335
GG-PET-18	F _{rup} 87,5% - CP 5 ¹	0,910		11,426
GG-PET-19	F _{rup} 90% - CP 1	0,057		10,889
GG-PET-20	F _{rup} 90% - CP 2	0,056	0,053	11,178
GG-PET-21	F _{rup} 90% - CP 3	0,047		11,075
GG-PET-22	F _{rup} 92,5% - CP 1	0,028		11,387
GG-PET-23	F _{rup} 92,5% - CP 2	0,021	0,026	11,252
GG-PET-24	F _{rup} 92,5% - CP 3	0,031		12,190
GG-PET-25	F _{rup} 95% - CP 1	0,008		11,898
GG-PET-26	F _{rup} 95% - CP 2 ¹	0,020	0,013	12,082
GG-PET-27	F _{rup} 95% - CP 3	0,011		11,883
GG-PET-28	F _{rup} 97,5% - CP 1	0,004		11,378
GG-PET-29	F _{rup} 97,5% - CP 2 ¹	0,0003	0,002	11,539
GG-PET-30	F _{rup} 97,5% - CP 3	0,0011		11,355

¹Ensaios que apresentaram grande discrepância em relação aos demais conduzidos no mesmo nível de carregamento.

Figura 5.45 – Curva de ruptura por fluência da GG-PET obtidas com corpos de prova em isolamento e resultado do ensaio confinado de ruptura por fluência: a) Escala vertical completa; b) Escala vertical modificada.

A Figura 5.45b apresenta o mesmo conjunto de dados, com uma alteração na escala do eixo das ordenadas para facilitar a visualização dos pontos. Os resultados dos ensaios convencionais de ruptura por fluência apresentaram um ajuste logarítmico satisfatório. Verificou-se que os valores médios são representativos do conjunto de dados. A regressão logarítmica realizada a partir destes valores resultaria em coeficientes angular e linear iguais a - 4,511 e 85,504, respectivamente ($y = -4,511 \cdot \log(x) + 85,504$). Esses valores são similares àqueles obtidos a partir da regressão realizada com todo o conjunto de dados considerados, resultando em uma diferença menor que 5% no coeficiente angular e de 1,5% no coeficiente linear.

Um único ensaio confinado de ruptura por fluência foi conduzido com a GG-PET com carregamento igual a 81,4% da resistência à tração do material. A execução desse ensaio exigiu a criação de uma nova configuração para o corpo de prova devido ao valor elevado da solicitação de tração a ser empregado. Assim, optou-se por verificar a influência do número

de elementos nas deformações por fluência a partir de ensaios convencionais conduzidos com corpos de prova adjacentes na amostra de GG-PET. O primeiro deles foi realizado com um corpo de prova com o número de elementos já empregado nos demais ensaios (sete). O segundo, por sua vez, possuía três elementos submetidos à solicitação de tração. A Figura 5.46 ilustra as curvas de fluência obtidas nesses ensaios.

Figura 5.46 – Curvas de fluência da GG-PET obtidas com corpos de prova em isolamento com diferentes números de elementos submetidos aos esforços de tração.

Apesar da diferença entre os valores de deformação inicial apresentados pelos dois corpos de prova, percebe-se que o número de elementos não é um fator influente no comportamento de deformação por fluência da GG-PET. Essa conclusão pode ser tomada a partir da proximidade entre os valores dos coeficientes angulares das retas de ajuste por regressão logarítmica apresentados na Figura 5.46. Dessa forma, optou-se por utilizar um corpo de prova com três elementos submetidos aos esforços de tração no ensaio confinado de ruptura por fluência. O aspecto desse corpo de prova é mostrado na Figura 5.47. Salienta-se que a porção do corpo de prova externa à câmara de ensaio necessita conter mais elementos, pois a ruptura seria atingida rapidamente nessa área devido à ausência de tensões confinantes. Adicionalmente, essa configuração do corpo de prova foi também empregada nos ensaios confinados de ruptura por fluência conduzidos com a GG-PP.

Figura 5.47 – Aspecto do corpo de prova empregado no ensaio confinado de ruptura por fluência com a GG-PET.

O nível de carregamento desejado nesse procedimento foi de 90%. Contudo, devido ao atrito entre o corpo de prova e as geomembranas usadas na montagem do ensaio, houve uma redução na solicitação de tração que atingiu o corpo de prova. Assim, o ensaio confinado de ruptura por fluência foi conduzido com carregamento igual a 81,4% da resistência à tração do geossintético e resultou em tempo de ruptura igual a 1,384 horas. Como pode ser verificado na Figura 5.45, este valor se encontra abaixo da reta ajustada com os dados dos ensaios convencionais de ruptura por fluência. Isso indica que a GG-PET sofreu alterações no tempo de ruptura por fluência devido ao confinamento em areia com tensão normal igual a 50 kPa. Esta conclusão é preliminar, uma vez que se baseia em apenas um ensaio e contradiz os resultados dos ensaios para verificação do comportamento em deformação por fluência sob tração, conforme foi exposto no item 5.2.1. Recomenda-se, portanto, a realização de ensaios adicionais com corpos de prova submetidos a diferentes níveis de carregamento em condição de confinamento em areia.

5.3.2. Geogrelha de polipropileno (GG-PP)

A GG-PP foi submetida a oito ensaios de ruptura por fluência, subdividindo os corpos de prova em dois grupos. O primeiro grupo foi utilizado em ensaios convencionais de ruptura por fluência, onde os corpos de prova não estão submetidos a nenhum confinamento. O segundo grupo foi empregado em ensaios confinados de ruptura por fluência, executados com o novo equipamento desenvolvido nesta pesquisa. A Figura 5.48 apresenta as curvas de fluência obtidas em cada ensaio conduzido com a GG-PP.

Figura 5.48 – Curvas obtidas a partir de ensaios de ruptura por fluência conduzidos com GG-PP com carregamento entre 60 e 90% da resistência à tração do geossintético: a) Corpos de prova em isolamento; b) Corpos de prova confinados em areia (tensão normal igual a 50 kPa).

Salienta-se que as escalas dos eixos foram mantidas nas Figura 5.48a e b com o propósito de facilitar a comparação entre as mesmas. As curvas de fluência obtidas com corpos de prova em isolamento apresentam-se com maior continuidade que aquelas encontradas nos ensaios confinados. Este aspecto é devido à execução dos ensaios não confinados em uma máquina universal de ensaios com extensometria ótica. Este sistema permite o acompanhamento mais preciso das deformações dos corpos de prova em comparação com o sistema empregado no novo equipamento de fluência em geossintéticos.

Um segundo ensaio convencional de ruptura por fluência foi conduzido com o corpo de prova submetido a 80% da resistência do geossintético. Contudo, houve uma falha na aquisição dos dados durante o ensaio e, assim, ele foi descartado. Percebe-se na Figura 5.48a que o ensaio convencional com 90% da resistência à tração da GG-PP foi repetido. O comportamento verificado nestes ensaios não foi satisfatório, uma vez que as curvas de

fluência se aproximam ora daquela obtida com carregamento de 70% da resistência à tração do material, ora daquela referente a 80% dessa grandeza. Ainda assim, optou-se por considerar a curva referente ao CP 1 para encontrar o tempo de ruptura por fluência nesse nível de carregamento, pois este ensaio apresentou um valor mais coerente em relação aos demais ensaios convencionais.

Outro aspecto que precisa ser destacado relaciona-se ao nível de carregamento empregado nos ensaios confinados. Verifica-se que a solicitação de tração empregada nos ensaios confinados é diferente daquelas utilizadas com corpos de prova em isolamento. Isso foi causado pelo atrito entre os corpos de prova e as geomembranas utilizadas na montagem dos ensaios confinados. Contudo, as principais informações de cada ensaio apresentado neste item são o nível de carregamento aplicado e o tempo necessário para a ruptura do corpo de prova. Com este par de valores, é possível estabelecer a relação entre esses parâmetros através das curvas de ruptura por fluência. Assim, uma vez que o objetivo desta série de ensaios é comparar as curvas de ruptura por fluência da GG-PP em diferentes condições, a diferença entre os níveis de carregamento empregados na condição confinada e em isolamento não se mostrou relevante.

O tempo para ruptura por fluência dos geossintéticos foi tomado no início da ocorrência da fluência terciária do material (ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004). Assim, foram traçadas duas retas. A primeira corresponde ao ajuste do trecho linear de cada curva de fluência. A segunda reta é tangente ao trecho correspondente à fluência terciária do corpo de prova. O valor de tempo onde ocorre o cruzamento destas duas retas subtraído do tempo necessário para aplicação do carregamento foi considerado como o tempo para ruptura por fluência do respectivo corpo de prova. A Figura 5.49 exemplifica este procedimento a partir da curva de fluência obtida no ensaio confinado de ruptura por fluência com carregamento igual a 58% da resistência à tração do geossintético. Em seguida, a Tabela 5.5 apresenta os valores de tempo de ruptura por fluência encontrados nos ensaios executados com a GG-PP e os respectivos valores de deformação.

Figura 5.49 – Exemplo da obtenção do tempo de ruptura por fluência da GG-PP (ensaio confinado com carregamento igual a 58% da resistência à tração do geossintético).

Tabela 5.5 – Tempos de ruptura por fluência obtidos nos ensaios conduzidos com GG-PP.

Designação do ensaio	Descrição do ensaio	Tempo total de ensaio (h)	Tempo para ruptura por fluência (h)	Deformação na ruptura (%)
GG-PP-1	F_{rup} 60%	29,46	1,470	6,919
GG-PP-2	F_{rup} 70%	1,20	0,373	9,540
GG-PP-3	F_{rup} 80%	0,18	0,139	14,701
GG-PP-5	F_{rup} 90% - CP 1	0,18	0,174	8,954
GG-PP-6	F_{rup} 90% - CP 2	0,22	0,064	12,546
GG-PP-7	FC_{rup} 48%	942,26	78,370	2,313
GG-PP-8	FC_{rup} 58%	317,06	58,626	5,799
GG-PP-9	FC_{rup} 68%	27,05	10,652	6,168
GG-PP-10	FC_{rup} 78%	10,45	6,614	3,609

A partir dos valores apresentados na Tabela 5.5, foi possível elaborar duas curvas de ruptura por fluência para a GG-PP, uma para a condição de isolamento dos corpos de prova e a segunda para aqueles submetidos ao confinamento em areia com tensão normal igual a 50 kPa. Esses resultados são apresentados na Figura 5.50.

Figura 5.50 – Curvas de ruptura por fluência da GG-PP obtidas com corpos de prova em isolamento e submetidos a tensão normal igual a 50 kPa.

As curvas de ruptura por fluência da GG-PP nas condições testadas (corpos de prova em isolamento e confinados em areia) apresentaram-se praticamente paralelas. Verifica-se que a distância horizontal entre as duas retas apresentadas na Figura 5.50 é de aproximadamente 1,5 ciclo logarítmico de tempo. Isso implica em uma diferença significativa no tempo de ruptura por fluência em qualquer nível de carregamento. Essa diferença é cada vez mais expressiva em valores menores de carregamento, devido à representação em escala semi-logarítmica. Por exemplo, tomando-se um nível de carregamento igual a 30% da resistência à tração, o tempo para ruptura por fluência em condição não confinada seria igual a 30,6 horas. Em condição confinada, este valor seria da ordem de 1030 horas. Caso o carregamento a que o corpo de prova está submetido fosse igual a 20% da resistência à tração do geossintético, estes valores seriam 88,1 e 2843 horas, respectivamente.

O paralelismo entre as curvas de fluência da GG-PP foi definido a partir de apenas uma série de ensaios em cada condição de confinamento. Os resultados encontrados parecem satisfazer o entendimento sobre o comportamento da GG-PP em ensaios de ruptura por fluência. Contudo, sugere-se ainda a execução de ensaios adicionais para comprovar aqueles obtidos até o momento.

5.4. Resistência residual dos geossintéticos

A realização de ensaios de tração de faixa larga após os ensaios de fluência dos geossintéticos visou avaliar a possível redução de resistência do material devido ao processo de fluência em diversas condições de confinamento e temperatura. Este procedimento foi realizado em caráter secundário nesta pesquisa e seus resultados podem ser empregados para avaliar o comportamento dos geossintéticos frente a carregamentos elevados ocorridos durante a vida útil da estrutura geotécnica onde esse materiais foram empregados (e.g. sismos ocorridos após a construção).

Os corpos de prova de dois geossintéticos (GG-PET e GTW) foram submetidos a ensaios de tração de faixa larga após a realização dos ensaios de fluência. Salienta-se que o carregamento nos corpos de prova empregados nos ensaios convencionais de fluência não foi removido após o seu término. Nesses casos, paralisou-se o ensaio de fluência e, imediatamente, prosseguiu-se com o ensaio de tração de faixa larga do respectivo corpo de prova ainda fixado à máquina universal de ensaios. Por outro lado, os corpos de prova utilizados nos ensaios não convencionais de fluência conduzidos no novo equipamento precisaram ser removidos do mesmo e então, após a montagem na máquina universal de ensaios, foram submetidos aos ensaios de tração.

A observação dos valores de resistência à tração de ambos os geossintéticos resultantes dos ensaios de tração de faixa larga conduzidos após os ensaios de fluência aponta que não houve redução significativa na resistência à tração devido à ocorrência da fluência nos materiais. Assim, uma vez que ambos os geossintéticos apresentaram comportamento semelhante em relação a esse aspecto, optou-se por agrupar os resultados desses ensaios em neste único item. No caso da GG-PET, a resistência média obtida com amostras virgens foi igual a 37,25 kN/m, com coeficiente de variação de 1,34%. A resistência média dos corpos de prova submetidos aos ensaios de fluência foi igual a 37,20 kN/m (C.V. = 2,08%). Esse aspecto também foi encontrado em relação ao GTW, cujos ensaios de tração apontaram resistência média igual a 50,93 kN/m (C.V. = 4,19%) em amostras virgens e 50,33 kN/m (C.V. = 5,66%) nos corpos de prova empregados nos ensaios de fluência. A Figura 5.51 apresenta os resultados dos ensaios de tração de faixa larga realizados após os ensaios de fluência, com as curvas plotadas de maneira contínua. Em seguida, a Tabela 5.6 exhibe os valores de resistência e deformação na ruptura encontrados nessa série de ensaios.

Figura 5.51 – Ensaio de tração de faixa larga com corpos de prova submetidos previamente a ensaios de fluência: a) GG-PET, parte 1; b) GG-PET, parte 2; c) GTW, parte 1; d) GTW, parte 2.

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios de tração de faixa larga realizados após o término dos ensaios de fluência.

Designação do ensaio	Descrição do ensaio	Duração do ensaio de fluência (h)	Resistência à tração (kN/m)	Deformação no ensaio de tração (%)	Deformação total (%)
GG-PET-1	F 20%	10,0	36,51	8,82	11,16
GG-PET-2	F 30% CP 1	10,0	36,65	6,39	10,44
GG-PET-3	F 30% CP 2	10,0	36,40	6,82	10,74
GG-PET-4	F 40%	10,0	37,70	5,88	11,25
GG-PET-5	F 50%	10,0	36,73	3,68	10,68
GG-PET-8	F 60%	10,0	37,47	3,65	11,94
GG-PET-9	F 70%	10,0	37,13	1,85	11,16
GG-PET-10	F 80%	10,0	38,56	0,70	11,42
GG-PET-31	FA 50% T = 60°C	96,7	38,44	9,19	17,63
GG-PET-33	FA 50% T = 43°C	15,2	37,26	8,82	18,16
GG-PET-36	FC 46% Solo	66,5	36,40	8,16	17,10
GTW-1	F 20%	10,0	53,32	8,74	13,66
GTW-2	F 30%	10,0	48,99	6,11	13,12
GTW-3	F 40%	10,0	45,76	4,22	14,51
GTW-4	F 50%	10,0	49,45	3,89	16,90
GTW-5	F 60%	10,0	52,56	3,51	17,92
GTW-6	F 70%	10,0	53,03	2,10	19,46
GTW-9	FA 30% T = 38°C	25,2	52,76	11,35	22,73
GTW-10	FA 30% T = 62°C CP 1	5,0	46,85	6,66	49,51
GTW-11	FA 30% T = 62°C CP 2	18,6	48,02	7,11	66,80
GTW-12	FC 28% Areia	168,1	52,60	10,67	17,81

Não foi possível identificar uma relação entre os parâmetros inerentes ao período de fluência (e.g. duração, nível de solicitação de tração, temperatura e tensão normal) e a resistência residual do geossintético. Para exemplificar esse aspecto, destaca-se que os

menores valores de resistência residual da GG-PET foram encontrados nos ensaios GG-PET-3 e GG-PET-36, que reproduziram condições diferentes de confinamento em solo. Esses ensaios resultaram numa resistência residual igual a 97,7% da resistência obtida em amostras virgens.

A redução de resistência obtida nos ensaios com o GTW foi ligeiramente mais significativa do que a apresentada pela GG-PET. O menor valor de resistência residual encontrado nos ensaios com esse geossintético foi igual a 89,8% da resistência em amostras virgens (ensaio GTW-3, F 40%). Destaca-se, também, a redução da resistência obtida nos ensaios GTW-10 e GTW-11, conduzidos após os ensaios de fluência em temperatura igual a 62°C, com corpos de prova em isolamento (92,0 e 94,2% da resistência de amostras virgens, respectivamente). Essa redução pode ter sido produzida, na verdade, por um efeito de degradação do material devido à temperatura elevada. Ainda assim, a resistência residual do GTW em termos médios apresentou-se muito próxima daquela obtida em amostras virgens, como descrito anteriormente.

A comparação entre os valores de resistência residual obtidos em diferentes condições de ensaio e a curva de ruptura por fluência dos geossintéticos ilustra a degradação do modo 3 característico desses materiais quando submetidos a ensaios de fluência. Salienta-se que esse modo é descrito pela perda de resistência quase instantânea quando o material está na iminência da ruptura. Assim, mesmo após longos períodos de fluência, a resistência à tração dos corpos de prova se mantém praticamente constante. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 5.52, que ilustra o nível de carregamento atingido nos ensaios de tração conduzidos após cada ensaio de fluência, convencional e não convencional, com a GG-PET e o GTW. Salienta-se que os dados provenientes de ensaios acelerados foram plotados na Figura 5.52 em função da duração correspondente à temperatura de referência (temperatura ambiente). Destaca-se que a curva de ruptura por fluência da GG-PET (Figura 5.52a) foi obtida com ensaios em carregamentos elevados (85 a 97,5% da resistência à tração) e extrapolada por mais de um ciclo logarítmico. A curva de ruptura por fluência do GTW (Figura 5.52b), por sua vez, é sugerida a partir de um único ensaio (80% da resistência à tração). Esses procedimentos não seguem as recomendações encontradas nas normas atuais, conforme o item 2.6. Ainda assim, ambas as curvas foram empregadas para se obter uma aproximação do comportamento em ruptura por fluência desses materiais.

Figura 5.52 – Resistência residual obtida após diferentes ensaios (tração e fluência): a) GG-PET; b) GTW.

Os resultados apresentados na Figura 5.52 indicam que, mesmo após longos períodos nos quais os corpos de prova foram submetidos a ensaios de fluência, a resistência residual do material não apresenta diminuição significativa. O comportamento identificado a partir desta série de ensaios confirma a hipótese de que a resistência à tração dos geossintéticos é independente do seu histórico de tensões. Os dois geossintéticos submetidos a ensaios de tração após o período de fluência apresentaram valores de resistência residual aproximadamente iguais àqueles obtidos com amostras virgens. Diversos estudos apontaram resultados semelhantes em relação a esse aspecto (HIRAKAWA et al., 2002; ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004; NAUGHTON e KEMPTON, 2006; JONES e CLARK, 2007).

No tocante às deformações dos corpos de prova durante os ensaios de tração de faixa larga realizados após os ensaios de fluência, pôde-se perceber comportamentos distintos entre os dois geossintéticos (GG-PET e GTW). A Figura 5.53 exemplifica esse aspecto.

Figura 5.53 – Comparação entre as curvas obtidas nos ensaios de tração de faixa larga com corpos de prova virgem e após o ensaio de fluência: a) GG-PET; b) GTW.

As curvas de solicitação de tração *versus* deformação da GG-PET obtidas após os ensaios de fluência tenderam a retomar a mesma trajetória encontrada nos ensaios com amostras virgens (Figura 5.53a). Assim, após a conclusão da etapa de carregamento constante (fluência), o corpo de prova apresenta maior rigidez. Em seguida, houve uma redução deste parâmetro, fazendo com que a curva seja praticamente coincidente com aquela obtida com a amostra virgem. Dessa forma, os valores de deformação na ruptura de ambos os corpos de prova foram similares entre si. Por outro lado, as deformações na ruptura do GTW em corpos de prova virgens e submetidos a fluência apresentaram-se significativamente diferentes, apesar dos valores de resistência próximos (Figura 5.53b). Percebe-se que houve também um aumento na rigidez do corpo de prova após o período de fluência, conforme ilustrado pela linha pontilhada na Figura 5.53b. Essa linha corresponde à translação da curva obtida no ensaio de tração após o período de fluência. A ocorrência das deformações por fluência, adicionada ao aumento na rigidez do corpo de prova, foi a causa da variação nas deformações na ruptura encontradas entre os corpos de prova de GTW virgens e submetidos à fluência.

5.5. Considerações adicionais

Este capítulo apresentou os resultados obtidos em diferentes séries de ensaios de laboratório pertinentes ao desenvolvimento do novo equipamento de fluência em geossintéticos. Esses ensaios foram agrupados em categorias segundo os seus objetivos.

Adicionalmente, outras verificações foram apresentadas no Capítulo 3, pertinentes ao desempenho do novo equipamento. Os principais aspectos inferidos a partir desses conjuntos de ensaios são comentados a seguir.

5.5.1. Comportamento em fluência dos geossintéticos estudados

Optou-se por empregar diferentes tipos de geossintéticos nos ensaios conduzidos nesta pesquisa devido ao caráter pioneiro do equipamento de fluência desenvolvido. Dessa forma, um maior número de ensaios com menor duração foi executado. Isso permitiu que fossem estudados os comportamentos em fluência de duas geogrelhas biaxiais (GG-PP e GG-PET), um geotêxtil tecido (GTW) e dois geotêxteis não tecidos (GTNcurto e GTNcont).

A partir dos ensaios convencionais conduzidos com esses geossintéticos, percebe-se que as deformações por fluência do GTW possuem uma dependência mais significativa em relação ao nível de carregamento, seguido pelo GTNcont e pela GG-PET. Esse comportamento é ilustrado na Figura 5.54, a partir da comparação dos valores de índice de fluência obtidos com cada material em diferentes níveis de carregamento. Salienta-se que esses ensaios referem-se à condição não confinada (corpos de prova em isolamento) e que não foram realizados ensaios suficientes com o GTNcurto e com a GG-PP para obtenção dessas curvas.

Figura 5.54 – Comparação entre os resultados dos ensaios convencionais de fluência com três geossintéticos (GTW, GTNcont e GG-PET) a partir da relação entre o índice de fluência e o nível de carregamento.

Esse comportamento não concorda com um importante aspecto do estudo da fluência em geossintéticos: os geotêxteis não tecidos são comumente relacionados entre os geossintéticos que apresentam maiores deformações por fluência. Apesar de ser manufaturado com filamentos contínuos, aspecto que torna o geotêxtil não tecido mais propenso a sofrer deformações por fluência, o GTNcont foi produzido com filamentos de poliéster, enquanto o GTW foi fabricado com laminetes entrelaçados de polipropileno. O polipropileno é mais susceptível à fluência que o poliéster, devido a sua própria estrutura molecular (KOERNER, 2005). Assim, esse fator foi preponderante na ocorrência de maiores deformações por fluência no GTW em comparação àquelas ocorridas com o GTNcont.

A GG-PET manteve-se como um material sujeito a pequenas deformações por fluência. A comparação dos seus resultados com aqueles obtidos com o GTNcont introduz o efeito do tipo de geossintético no comportamento em fluência sob tração e confirma o conhecimento estabelecido na literatura técnica. Percebe-se, como esperado, que as geogrelhas são materiais menos susceptíveis à ocorrência de deformações por fluência que os geotêxteis não tecidos.

O comportamento em deformação por fluência de todos os geossintéticos avaliados foi dependente da temperatura e o fator de translação pode ser empregado para verificar essa influência. Esse aspecto é explicitamente citado na literatura (FARRAG; SHIRAZI, 1997). Contudo, é interessante salientar que os geotêxteis (GTW e GTNcont) apresentaram uma relação entre fator de translação e temperatura que pôde ser representada pelo inverso de uma função linear. Essa relação é mais bem retratada por um polinômio de segundo grau quando os ensaios conduzidos com a GG-PET são considerados. Adicionalmente, o GTNcont e a GG-PET apresentaram fatores de translação menores na condição confinada do que aqueles encontrados com corpos de prova em isolamento. Isso indica que ensaios em temperatura elevada conduzidos com o GTNcont e com a GG-PET em condição confinada apresentam, quando interpretados, uma extensão maior no tempo fictício, i.e. na duração do ensaio caso este fosse executado na temperatura de referência. O oposto foi obtido nos ensaios realizados com o GTW.

A análise dos resultados dos ensaios realizados com cada material permite enfatizar alguns de seus aspectos peculiares. Assim, apresentam-se, a seguir, alguns comentários sobre cada tipo de geossintético.

5.5.1.1. Geogrelhas

Duas geogrelhas foram empregadas nos ensaios executados nesta pesquisa. Primeiramente, destacam-se os resultados dos ensaios de comportamento em deformação por fluência sob tração da GG-PET em temperatura ambiente. Eles indicaram uma expressiva redução nas deformações por fluência da GG-PET devido ao confinamento em areia com 50 kPa de tensão normal. De fato, pode-se considerar que esse geossintético não sofreu deformações por fluência nessa condição. O índice de fluência encontrado no ensaio confinado foi igual a 0,014, 94,2% menor que o valor encontrado no ensaio convencional (0,243). Um comportamento similar foi encontrado nos ensaios realizados em temperatura elevada (aproximadamente 43°C). Contudo, a redução no índice de fluência foi menos significativa nessa temperatura (cerca de 53%). Salienta-se que esses valores referem-se aos ensaios de fluência conduzidos com solicitação de tração aproximadamente igual a 50% da resistência do geossintético.

Apesar do forte indicativo da dependência que o comportamento em fluência que os ensaios realizados com a GG-PET apresentaram, esse aspecto não foi percebido nos ensaios de ruptura por fluência. Essa conclusão ainda possui caráter inicial, pois se baseia em um único ensaio confinado de ruptura por fluência. Conforme ilustrado na Figura 5.45, o valor de tempo para ruptura obtido nesse ensaio situou-se abaixo da curva de ruptura por fluência encontrada a partir de ensaios convencionais, não confinados. Assim, com base nesses dois aspectos, pode-se afirmar que o confinamento em areia alterou o nível de deformações por fluência que se processaram na GG-PET, reduzindo-as, mas afetou o tempo para ruptura por fluência da geogrelha de maneira oposta, levando a uma condição menos desejada em projeto.

Os ensaios de tração conduzidos com corpos de prova que foram submetidos a ensaios de fluência destacam outro importante aspecto da GG-PET. A resistência residual desse geossintético permanece muito próxima àquela obtida com amostras virgens. Esse fato indica que a ocorrência de uma degradação do modo 3, com a redução quase imediata da resistência quando da iminência da ruptura. Assim, a GG-PET pode ser considerada com uma resistência próxima daquela obtida em amostras virgens caso alguma solicitação extraordinária ocorra durante sua vida útil. Um vez que se trata de uma conclusão baseada em um pequeno número de ensaios, este aspecto deve ser investigado mais profundamente. Salienta-se, ainda, que esse comportamento é amplamente abordado na literatura técnica

(HIRAKAWA et al., 2002; ZORNBERG; BYLER; KNUDSEN, 2004; NAUGHTON e KEMPTON, 2006; JONES e CLARK, 2007). O GTW apresentou um desempenho semelhante, que será apresentado no item 5.5.1.2.

A segunda geogrelha empregada nesta pesquisa (GG-PP) teve uma série de ensaios menor e que consistiu apenas de ensaios de ruptura por fluência. Ainda assim, este material apresentou um aspecto interessante: a curva de ruptura por fluência obtida a partir de ensaios confinados é praticamente paralela àquela obtida com corpos de prova em isolamento. Embora esse aspecto tenha sido verificado a partir de uma única série de ensaios, é um passo para a definição de fatores de redução devido à fluência menos conservadores.

5.5.1.2. Geotêxtil tecido

Uma primeira análise dos resultados dos ensaios de fluência executados com o geotêxtil tecido (GTW) empregado nesta pesquisa indica que o confinamento em areia reduziu as deformações por fluência do material. Essa redução pode ser percebida através da diminuição do índice de fluência, conforme apresentado na Figura 5.27, e parece ser mais suave em temperatura ambiente do que em temperatura igual a 38°C. Em temperatura ambiente, o índice de fluência passou de 1,217 para 0,902 quando o corpo de prova foi submetido ao confinamento em areia. Em temperatura elevada, essa redução foi de 2,140 para 1,014. Por outro lado, uma avaliação mais criteriosa dos resultados exibidos na Figura 5.27 mostra que as curvas de fluência tendem a apresentar a mesma forma em determinado momento. Esse comportamento é ilustrado pela Figura 5.55, que aponta um destaque nos trechos que possuem o mesmo formato das curvas mostradas na Figura 5.27.

Esses trechos com mesmo formato indicam que as deformações por fluência estão ocorrendo com a mesma velocidade. A diferença nas deformações iniciais dos corpos de prova devido à aplicação manual da solicitação de tração tem efeito sobre as deformações por fluência. Apesar de o tempo de aplicação do carregamento possuir uma mesma ordem de grandeza, essa influência deve ser significativa até um certo momento do ensaio de fluência. A partir de então, as deformações por fluência se processam de maneira similar e as formas das curvas ilustradas novamente na Figura 5.55 se assemelham.

Figura 5.55 – Efeito do confinamento em areia nos ensaios conduzidos com o GTW com destaque para o paralelismo entre as curvas: a) Ensaios em temperatura ambiente; b) Ensaios em temperatura elevada (38°C).

Os resultados dos ensaios com o GTW indicam que o comportamento em fluência deste geossintético tem pouca dependência em relação ao confinamento em areia. Uma explicação para isso seria o fato de este material apresentar-se completamente liso e com elementos entrelaçados de maneira organizada. Contudo, sugere-se que ensaios adicionais sejam conduzidos após a implementação das sugestões a serem mostradas no item 0. Dessa forma, esse comportamento poderá ser caracterizado através de ensaios com maior repetibilidade na taxa de aplicação da solicitação de tração.

Outro aspecto importante que deve ser destacado a partir da série de ensaios de fluência com o GTW é a repetibilidade dos resultados obtidos nos ensaios acelerados de fluência conduzidos com temperatura igual a 68°C. Esse ensaio foi repetido para contornar uma falha no fornecimento de energia. Devido ao propósito de verificar o comportamento de uma gama maior de geossintéticos, não foram realizadas séries de ensaios para avaliar especificamente a repetibilidade dos resultados. Contudo, a Figura 5.22 ilustra claramente que

o segundo ensaio executado nessas condições apresentou-se satisfatoriamente similar ao primeiro.

5.5.1.3. Geotêxteis não tecidos (GTNcurto e GTNcont)

Entre os geossintéticos empregados nesta pesquisa, os geotêxteis não tecidos apresentaram comportamento em fluência com maior dependência em relação ao confinamento em areia. Houve uma redução expressiva tanto nas deformações por fluência como nas deformações iniciais de ambos os geotêxteis não tecidos devido ao confinamento em areia. Esse desempenho é comumente citado na literatura pertinente (COSTA, 1999; KOERNER, 2005).

Os estudos da fluência de cada geotêxtil não tecido foram conduzidos com propósitos distintos. O GTNcurto foi utilizado para verificar o desempenho geral do equipamento. Por este motivo, sua série de ensaios de fluência foi mais curta e com valores menores de solicitação de tração. O GTNcont, por sua vez, foi empregado em um número maior de ensaios e com níveis de carregamento mais elevados. Portanto, a comparação dos resultados dos ensaios conduzidos com esses materiais precisa ser feita cautelosamente.

Apesar das diferenças entre as séries de ensaios conduzidos com os dois materiais, pode-se considerar os ensaios convencionais de fluência conduzidos com nível de carregamento igual a 20% da resistência à tração para obter uma perspectiva das diferenças entre o comportamento em fluência dos dois geotêxteis não tecidos. Percebe-se, a partir desses ensaios, que as deformações por fluência do GTNcont apresentaram-se mais relevantes (5,54% em 102 horas) do que os valores obtidos com o GTNcurto (2,99% em 100 horas). Por outro lado, as deformações iniciais foram mais expressivas no ensaio realizado com o GTNcurto (32,26%, contra 19,33% no ensaio com o GTNcont). A Tabela 5.7 resume essas informações.

Os dois geotêxteis são manufaturados a partir do agulhamento de fibras de poliéster. A diferença mais evidente entre esses materiais é o comprimento das fibras, uma vez que o GTNcurto foi fabricado por meio do agulhamento de fibras curtas e o GTNcont, por agulhamento de filamentos contínuos. Assim, a explicação desse comportamento se baseia no fato de as deformações em tração em geotêxteis não tecidos acontecerem devido à movimentação relativa entre as fibras e ao alongamento das mesmas. Os geotêxteis não tecidos manufaturados com fibras curtas e solicitados em tração permitem uma maior

movimentação relativa entre as fibras. Assim, essa movimentação ocorre com maior intensidade imediatamente após a aplicação do carregamento. Em seguida, com a manutenção da solicitação de tração, as fibras continuam a deslizar entre si e a alongarem-se. Esse comportamento é visualizado macroscopicamente por meio da obtenção de deformações iniciais maiores e deformações por fluência menos expressivas. Por outro lado, o comportamento oposto é percebido com os geotêxteis não tecidos com filamentos contínuos. Devido a uma menor movimentação relativa entre os filamentos, as deformações iniciais são menores e são seguidas por deformações por fluência mais significativas. Assim, a partir das evidências apontadas acima, percebe-se que este aspecto foi determinante na quantificação das deformações iniciais e por fluência dos geotêxteis não tecidos empregados nesta pesquisa.

Tabela 5.7 – Valores considerados na comparação do comportamento em fluência dos geotêxteis não tecidos a partir dos ensaios convencionais.

Parâmetro	GTNcurto	GTNcont
Nível de carregamento ¹ (%)	20,0	20,0
Deformação inicial (%)	32,26	19,33
Deformação por fluência (até 100 h) (%)	2,99	5,54
Deformação por fluência (fim do ensaio) (%)	2,99 (100 h)	6,95 (1315 h)

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência à tração do respectivo geossintético (ASTM D 6637).

A dependência do comportamento em fluência dos geotêxteis não tecidos em relação ao confinamento em areia pôde ser percebida através da redução nos valores do índice de fluência, T_α . Salienta-se que esse parâmetro indica a taxa com que as deformações por fluência ocorrem. Mesmo que os materiais tenham sido submetidos a níveis de carregamento diferentes, as condições confinada e em isolamento foram comparadas com valores iguais de solicitação de tração em cada geotêxtil não tecido. A razão entre o índice de fluência obtido com corpos de prova sob confinamento e em isolamento foi igual a 0,179 para o GTNcurto e 0,147 para o GTNcont. Percebe-se, portanto, que as razões entre esses parâmetros apresentaram a mesma ordem de grandeza. Salienta-se que a tensão normal aplicada nos ensaios confinados de fluência com o GTNcurto foi igual a 30 kPa, enquanto que o valor utilizado nos ensaios confinados executados com o GTNcont foi igual a 50 kPa. Assim, a diferença entre as razões entre os valores de índice de fluência na condição confinada e em isolamento justifica-se pela aplicação de valores diferentes de tensões normais nos ensaios executados com cada geossintético.

Outro aspecto que apoia esta constatação baseia-se na relação entre as deformações por fluência ocorridas em cada condição (em isolamento e sob confinamento), com cada geotêxtil não tecido. Tomando-se, por exemplo, o comportamento desses materiais até 30 horas após a aplicação do carregamento, percebe-se que a redução nas deformações por fluência devido ao confinamento em areia do GTNcont (89,8%) foi mais expressiva que a apresentadas pelo GTNcurto (77,4%). As Tabela 5.8 e

Tabela 5.9 apresentam os valores considerados nesse cálculo para o GTNcurto e o GTNcont, respectivamente. Vale ainda ressaltar que o período de 30 horas foi escolhido por ser o maior valor em que os quatro ensaios considerados apresentaram leituras realizadas.

Tabela 5.8 – Valores considerados na comparação da influência do confinamento em areia no comportamento em fluência do GTNcurto.

Parâmetro	Ensaio convencional	Ensaio confinado
Nível de carregamento ¹ (%)	20,0	20,0
Deformação inicial (%)	32,26	21,61
Deformação por fluência (até 30 h) (%)	2,83	0,64
Índice de fluência	0,559	0,100

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência à tração do respectivo geossintético (ASTM D 6637).

Tabela 5.9 – Valores considerados na comparação da influência do confinamento em areia no comportamento em fluência do GTNcont.

Parâmetro	Ensaio convencional	Ensaio confinado
Nível de carregamento ¹ (%)	50,0	50,1
Deformação inicial (%)	35,14	6,63
Deformação por fluência (até 30 h) (%)	7,06	0,72
Índice de fluência	1,290	0,190

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência à tração do respectivo geossintético (ASTM D 6637).

5.5.2. Desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos

O desempenho do novo equipamento de fluência em geossintéticos foi avaliado a partir de diversos procedimentos, realizados durante o seu desenvolvimento e após a conclusão de sua montagem. Adicionalmente, ensaios conduzidos com o GTNcurto foram utilizados nessa verificação. Esses procedimentos foram apresentados nos Capítulos 3 e 5, respectivamente.

5.5.2.1. Verificações durante o desenvolvimento do novo equipamento

Entre os procedimentos para averiguar o comportamento do novo equipamento de fluência em geossintéticos encontram-se aqueles que verificaram o funcionamento dos vários sistemas, individualmente. Esses sistemas e suas verificações foram apresentados no Capítulo 3. A partir desses procedimentos, pode-se destacar os seguintes aspectos:

- O sistema de aquecimento foi capaz de manter uma temperatura satisfatoriamente constante em todos os ensaios realizados com o novo equipamento. O maior coeficiente de variação das leituras de temperatura foi igual a 1,09% (GG-PET-31), num ensaio conduzido com temperatura média igual a 60,7°C.
- As solicitações de tração aplicadas nos corpos de prova no novo equipamento apresentaram-se praticamente constantes, com coeficiente de variação das leituras menor que 4,6% (GTW-11). Tipicamente, este valor foi da ordem de 1,5%.
- O sistema de reprodução do confinamento apresentou-se estável, oscilando entre o valor programado com coeficiente de variação máximo igual a 5,75% na montagem com corpo de prova posicionado no interior da câmara de ensaio.
- Os demais sistemas funcionaram conforme planejado (medição do alongamento dos corpos de prova e aquisição dos dados). Contudo, cortes no fornecimento de energia elétrica destacam a necessidade de implantação de um sistema auxiliar para ser utilizado nessas situações.

5.5.2.2. Verificações após o desenvolvimento do novo equipamento

Destacam-se duas verificações realizadas durante esta pesquisa após completar-se o desenvolvimento do novo equipamento de fluência em geossintéticos. Esses procedimentos chamaram a atenção para dois aspectos peculiares do novo equipamento de fluência em geossintéticos.

Em primeiro lugar, a averiguação da distribuição das tensões normais no interior da câmara de ensaio foi executada em duas montagens: com e sem o corpo de prova. A montagem sem o corpo de prova identificou uma distribuição não uniforme de tensões verticais no interior da câmara de ensaio, com valores maiores na sua região central. Apesar da obtenção de um valor médio igual a cerca de 99% do valor medido no painel de pressão, a

faixa de interesse dos corpos de prova estaria submetida a uma tensão vertical aproximadamente 12% maior que este valor. Adicionalmente, verificou-se uma diferença em relação a tensão vertical mensurada em maiores profundidades. Dessa forma, optou-se por repetir este procedimento com o corpo de prova instalado, o que simularia um ensaio executado no novo equipamento. A distribuição das tensões verticais foi diferente nesta configuração e apontou que a faixa de interesse estaria submetida a um acréscimo de cerca de 33% em relação ao valor medido no painel de pressão. Contudo, esse comportamento não é justificado, uma vez que a tensão vertical média resultou em um valor maior que a pressão de ar aplicada pelo painel de pressão. Assim, esse aspecto não foi considerado e optou-se por adotar os valores nominais de tensão normal aplicados nos ensaios confinados e confinado-acelerados conduzidos com o novo equipamento. Os valores nominais foram considerados iguais àqueles registrados pelo painel de pressão.

O segundo aspecto particular dos ensaios de fluência conduzidos com o novo equipamento diz respeito ao atrito entre a geomembrana de PEAD e as regiões reforçadas dos corpos de prova. Os ensaios de cisalhamento direto de interface permitiram a quantificação deste parâmetro e a sua consideração nos resultados apresentados. Contudo, trata-se de um aspecto que não estava inicialmente previsto no programa de ensaios e a sua verificação foi tardia em relação aos ensaios de fluência realizados com o novo equipamento. Mesmo assim, foi possível inserir os resultados dessa verificação na análise dos ensaios conduzidos com o novo equipamento e determinar a influência do confinamento no comportamento de fluência dos geossintéticos empregados de maneira satisfatória.

5.5.2.3. Verificações do novo equipamento a partir de ensaios

Dois ensaios foram conduzidos em caráter de avaliação do desempenho do novo equipamento apresentado nesta tese. Eles foram executados com um geotêxtil não tecido (GTNcurto) e permitiram analisar tanto o comportamento geral do equipamento, como a constância de alguns parâmetros (solicitação de tração e temperatura).

Os ensaios conduzidos no novo equipamento com o GTNcurto mostraram a influência do confinamento em areia e da temperatura na fluência desse geossintético. Estes ensaios foram conduzidos com um nível de carregamento igual a cerca 20% da resistência à tração do geossintético. Embora pequenas deformações por fluência fossem esperadas com esse carregamento, foi possível identificar a variação do índice de fluência e das deformações

iniciais devido ao confinamento em areia e à variação da temperatura. Assim, pode-se afirmar que o novo equipamento de fluência em geossintéticos apresentou um comportamento satisfatório e atendeu ao seu propósito.

Esses ensaios também foram empregados para averiguar a estabilidade dos sistemas de carregamento e de elevação da temperatura. Apesar da necessidade de pequenos ajustes ao longo dos ensaios, as leituras correspondentes à solicitação de tração aplicada ao corpo de prova apresentaram coeficiente de variação máximo igual a 1,52%. Em relação ao sistema de aquecimento, o ensaio confinado-acelerado de fluência apontou um coeficiente de variação das leituras de temperatura igual a 0,93%. Destaca-se ainda que houve duas interrupções no controle da temperatura de ensaio devido a paralizações no fornecimento de energia do laboratório. Ainda assim, o equipamento manteve uma temperatura praticamente constante no compartimento superior da câmara de ensaio por um período de aproximadamente 40 minutos, quando o fornecimento de energia elétrica foi reestabelecido.

6. Implementações no novo equipamento e pesquisas futuras

Apesar do desempenho satisfatório do novo equipamento de fluência em geossintéticos, sugere-se a melhoria de cinco aspectos principais: aplicação da solicitação de tração, redução do atrito na área reforçada dos corpos de prova, método para determinação da força que atinge a faixa central dos corpos de prova e suas deformações, dimensionamento de um sistema contra interrupções no fornecimento de energia elétrica e melhoria nos cabos de aço e suas conexões. Estes pontos foram levantados a partir da execução de diversos ensaios e da experiência do autor desta tese.

6.1. Aplicação da solicitação de tração

O novo equipamento foi concebido e desenvolvido de maneira que a aplicação da solicitação de tração aos corpos de prova seja realizada por dois operadores, simultaneamente, através de um processo completamente manual. A maior implicação disso é a variação na velocidade de aplicação do carregamento, que, por sua vez, implica na variação das deformações iniciais do corpo de prova. Além disso, pode-se destacar também a diferença nos valores mensurados pelas duas células de carga. Essa discrepância é provocada pela atuação dos dois operadores, sincronizados apenas por contato visual. Assim, os corpos de prova podem não ser submetidos aos esforços de tração de maneira uniforme.

A velocidade de carregamento exibiu a mesma ordem de grandeza nos ensaios conduzidos com o novo equipamento. Contudo, esse parâmetro apresentou valores diferentes. Dessa forma, a primeira sugestão para melhoria do novo equipamento é provê-lo com um novo sistema para aplicação do carregamento. Esse sistema precisa contornar os dois obstáculos identificados: aplicar o carregamento uniformemente nas duas extremidades dos corpos de prova e manter uma velocidade constante de aplicação.

Com o propósito de manter a uniformidade na aplicação do carregamento nas duas extremidades dos corpos de prova, propõe-se uma modificação simples ao novo equipamento de fluência em geossintéticos. A configuração atual utiliza dois macacos hidráulicos para aplicação do carregamento, cada qual posicionado em uma extremidade do equipamento. A partir de uma complementação no conjunto de polias e cabos de aço do novo equipamento, pode-se conduzir o ponto de aplicação dos pesos livres para a porção central do

mesmo e torná-los um único ponto. Assim, os pesos livres seriam aplicados apenas na região central do equipamento. A Figura 6.1 ilustra a configuração atual, empregada nesta pesquisa, e a situação proposta para aplicar um esforço uniforme em ambas as extremidades dos corpos de prova. Salienta-se que esta configuração sugerida necessita que o dobro do carregamento seja aplicado por meio dos pesos livres em relação ao carregamento utilizado na formatação atual.

Figura 6.1 – a) Configuração do novo equipamento de fluência em geossintéticos empregada nos ensaios apresentados nesta tese; b) Configuração sugerida para permitir a aplicação uniforme da solicitação de tração nos corpos de prova.

O outro aspecto relacionado ao sistema de carregamento presente no novo equipamento de fluência em geossintéticos diz respeito à velocidade de aplicação da solicitação de tração. Este empecilho pode ser solucionado a partir da implementação de um sistema automatizado para o recolhimento do pistão do macaco hidráulico. Assim, sugere-se a utilização de um pistão acoplado ao sistema de ar pressurizado do laboratório e que possa ser acionado com velocidade controlada. Portanto, é necessário que se tenha um controle da pressão de ar nesse pistão. Um sistema similar já é utilizado no Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos e pode ser adaptado para esta função.

6.2. Redução do atrito na região reforçada dos corpos de prova

Procurou-se reduzir o atrito entre as regiões reforçadas dos corpos de prova e as geomembranas de PEAD utilizadas para evitar o contato dessas porções com o meio

confinante. Ainda assim, foram encontrados valores que podem ser considerados expressivos quando o nível de solicitação de tração a ser aplicado aos corpos de prova é baixo. Por outro lado, esse aspecto não é um impedimento à execução dos ensaios de fluência com o novo equipamento, uma vez que o atrito pode ser considerado nos cálculos dos pesos livres a serem utilizados. Assim, aplicar-se-iam carregamentos maiores que aqueles necessários para atingir o nível de solicitação desejada.

Apesar de não representar um obstáculo à execução dos ensaios com o novo equipamento, sugere-se uma continuação da busca por uma configuração que reduza a influência desse aspecto. A utilização de mangas metálicas lubrificadas instaladas no interior da câmara de ensaio pode ser considerada como uma alternativa, conforme ilustrado na Figura 6.2. Seriam, portanto, instaladas mangas similares àsquelas usadas em ensaios de arrancamento de geossintéticos. Contudo, o emprego desta opção exige um estudo paramétrico detalhado para determinar a melhor geometria a ser utilizada e as propriedades do material usado em sua fabricação (i.e. largura e comprimento da manga, espessura da chapa metálica, rigidez do material e da estrutura da manga e espaçamento entre as mesmas).

Figura 6.2 – Proposta de melhoria do novo equipamento visando a redução do atrito nas regiões reforçadas dos corpos de prova: (a) Configuração empregada no novo equipamento de fluência em geossintéticos; b) Configuração sugerida.

6.3. Medição da solicitação de tração na faixa de interesse dos corpos de prova e cálculo das deformações

O cálculo do atrito de interface exposto no item 3.3.1.1 e comentado no item anterior é uma maneira de inferir a solicitação de tração que atinge a faixa de interesse dos corpos de prova. Apesar da livre movimentação das garras sobre os trilhos e da utilização de células de carga próximas a elas, esse método ainda apresenta incertezas em relação à determinação desse esforço. Os ensaios de cisalhamento direto de interface podem não ter reproduzido perfeitamente a situação encontrada nos ensaios confinados e confinado-acelerados conduzidos no novo equipamento. Além disso, o atrito desenvolvido entre as garras e os trilhos pode aumentar a diferença entre as leituras apontadas pelas células de carga e os esforços de tração que atingem a faixa de interesse dos corpos de prova.

Outro aspecto que merece destaque nesse contexto é a determinação das deformações da faixa de interesse dos corpos de prova. Apesar de a utilização de fios inextensíveis e transdutores de deslocamento ter se mostrado satisfatória, outros sistemas mais precisos podem ser implementados ao novo equipamento. Assim, o estabelecimento de uma nova metodologia para medição da solicitação de tração que atinge a faixa de interesse dos corpos de prova e a determinação das suas deformações seria uma implementação importante ao novo equipamento de fluência em geossintéticos.

A instalação de extensômetros elétricos (*strain gages*) aos corpos de prova proveriam o operador dos ensaios com dados de deformação do geossintético. Em seguida, esses dados poderiam ser interpretados de forma a permitir o cálculo da força aplicada na faixa de interesse do corpo de prova. Essa alternativa exigiria cuidados especiais em relação à preparação dos corpos de prova e colagem dos extensômetros e à proteção contra umidade e danos causados pelo lançamento e compactação do meio confinante.

Uma segunda alternativa seria a utilização de transdutores de deformação, que consistem em elementos mais robustos e resistentes, desenvolvidos para determinar as deformações de geossintéticos submetidos a esforços de tração e apresentar deformações compatíveis com esses materiais. Um desses equipamentos encontra-se em desenvolvimento no Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos. Outra alternativa à utilização de células de carga e fios inextensíveis seria a instrumentação do corpo de prova por fibra ótica. Essa tecnologia baseia-se na variação do tempo necessário para um pulso luminoso percorrer a fibra devido à variação no comprimento da mesma. É um método mais

acurado para determinação das deformações dos corpos de prova.

Ainda que quaisquer dessas alternativas sejam implementadas no novo equipamento de fluência em geossintéticos, sugere-se que sejam mantidas as células de carga na posição atual. Propõe-se, também, que o novo sistema para determinação das deformações dos corpos de prova seja utilizado juntamente com o sistema atual (fios inextensíveis e transdutores de deslocamento). Assim, as células de carga e o sistema atual de medição do alongamento do corpo de prova assumiriam uma função secundária para o controle do carregamento aplicado aos corpos de prova e de suas deformações.

6.4. Sistema contra interrupções no fornecimento de energia elétrica

Apesar de não terem afetado os ensaios conduzidos nessa pesquisa, algumas interrupções no fornecimento de energia provocaram perdas de leituras em alguns ensaios. Assim, sugere-se o desenvolvimento de um sistema contra interrupções no fornecimento de energia elétrica. Trata-se de uma tarefa de baixa complexidade e que pode ser rapidamente implementada com a aquisição de uma fonte de alimentação ininterrupta (*no-break*).

6.5. Cabos de aço e suas conexões

A resistência nominal dos cabos de aço usados no sistema de carregamento do novo equipamento de fluência em geossintéticos é igual a 4.450 N. A maior solicitação de tração empregada nos ensaios de fluência realizados nesta pesquisa foi igual a 3.819 N, aplicada durante o ensaio confinado em solo conduzido com a GG-PET. Assim, percebe-se que a resistência dos cabos de aço não foi um fator limitante na série de ensaios para determinação do comportamento em deformação por fluência sob tração dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa.

Por outro lado, os ensaios de ruptura por fluência com corpos de prova padrão empregariam valores de nível de carregamento mais elevados, que resultariam, por exemplo, em esforços máximos nos cabos de aço da ordem de 6.630 N nos ensaios com a GG-PET submetida a um carregamento igual a 90% da sua resistência à tração. Esse valor ultrapassaria a resistência nominal dos cabos de aço. Estabeleceram-se, portanto, novas dimensões para os corpos de prova usados nos ensaios de ruptura por fluência dos geossintéticos, como descrito

no item 5.3.1. Essa nova configuração permitiu a utilização de carregamentos menores, aplicáveis a atual configuração do novo equipamento.

Apesar de não ter sido um fator limitante à realização dos ensaios desejados, sugere-se que a resistência nominal dos cabos de aço e suas conexões com os elementos do novo equipamento sejam aumentadas com o propósito de permitir a aplicação de solicitações de tração mais elevadas aos corpos de prova. Assim, não seria necessário modificar a configuração dos corpos de prova e a montagem dos ensaios passaria a ser mais simplificada. Para isso, podem ser empregados cabos de aço mais resistentes. Em relação às conexões com os elementos do novo equipamento, destaca-se um ponto crítico na ligação com as células de carga. Devido ao espaço restrito, essa conexão foi difícil de ser realizada. Uma alternativa seria a utilização de células de carga específicas para mensurar esforços de tração em cabos de aço. Esses aparelhos são comercializados pela empresa fornecedora das células de carga empregadas no novo equipamento, entre outras.

6.6. Sugestões para pesquisas subsequentes

Esta pesquisa objetivou, principalmente, o desenvolvimento do novo equipamento de fluência em geossintéticos. A partir das verificações individuais dos seus sistemas e dos diversos ensaios realizados, percebe-se que o novo equipamento apresentou um desempenho satisfatório. Contudo, os ensaios executados nesta pesquisa levantaram questões que precisam de investigações adicionais. Parte desses aspectos podem ser estudados a partir da realização de novos ensaios com os geossintéticos estudados ou com outros materiais. Por outro lado, algumas questões necessitarão de adaptações mais profundas do novo equipamento, de forma a contemplar os requisitos técnicos aplicáveis.

Primeiramente, destaca-se a importância da definição da resistência à tração dos geossintéticos. O carregamento aplicado nos ensaios confinados são referenciados à resistência à tração do material obtida em ensaios com corpos de prova em isolamento. Este aspecto pode induzir a falsas interpretações em relação à influência do confinamento na fluência dos geossintéticos. Verifica-se que a resistência à tração de alguns geossintéticos é dependente do confinamento em solo (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 1998). Assim, quando se afirma, por exemplo, que o confinamento restringiu as deformações de um determinado geossintético submetido a um esforço de tração igual a 50% da sua resistência à tração, esse valor pode corresponder a, apenas, 20% da resistência à tração do material em

condições confinadas. Dessa forma, parâmetros diferentes estão sendo comparados e, portanto, levando a conclusões equivocadas. Essa preocupação pode ser sanada a partir da execução de ensaios confinados de tração em geossintéticos. Assim, o carregamento a ser aplicado nos ensaios confinados de fluência seriam referenciados a esses ensaios, num mesmo nível de tensão normal.

O novo equipamento de fluência em geossintéticos apresentado nesta tese pode ser adaptado para a execução de ensaios confinados de tração em geossintéticos. Utilizando-se o controle automático do pistão sugerido no item 6.1, os corpos de prova podem ser solicitados até a ruptura com uma velocidade constante, enquanto as suas deformações podem ser calculadas a partir das leituras provenientes dos fios inextensíveis. Dessa forma, quaisquer condições de ensaio de fluência poderiam ser reproduzidas nos ensaios de tração e, portanto, os carregamentos seriam sempre referidos à resistência à tração numa mesma condição. Isso pode ser expandido, inclusive, para os efeitos da temperatura na fluência dos geossintéticos.

Um segundo aspecto que pode ser estudado a partir de adaptações no novo equipamento é o fenômeno da relaxação de tensões nos corpos de prova. A instalação de um sistema que mantenha as garras fixas, enquanto a força é mensurada na faixa de interesse do corpo de prova seria suficiente para atender esse objetivo. A utilização de extensômetros elétricos pode ser aplicado como alternativa para isso.

Em relação à realização de ensaios adicionais, sugere-se a execução de ensaios convencionais de fluência no novo equipamento, com o propósito de verificar a repetibilidade comparada aos ensaios conduzidos com o aparato normalizado. Sugere-se, ainda, que sejam previstos ensaios que permitam visualizar a variação do índice de fluência com o nível de carregamento aplicado ao corpo de prova. Assim, poder-se-ia comparar o comportamento de diversos tipos de geossintéticos em fluência sob condições confinadas, como foi apresentado no item 5.5.1 para corpos de prova em isolamento. Adicionalmente, esses ensaios adicionais podem ser executados com valores de tensão normal diferentes para verificar a influência desse parâmetro nas deformações por fluência dos geossintéticos estudados.

Sugere-se também a realização de ensaios adicionais para a construção de curvas de ruptura por fluência em condições confinadas para outro geossintéticos. Isso permitiria quantificar a variação nos fatores de redução devido a fluência a serem adotados em projeto de estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Propõe-se, ainda, que se verifique a resistência residual dos materiais empregados em ensaios adicionais com o novo equipamento, de acordo com o procedimento exposto nesta tese. Assim, um banco de dados

mais abrangente pode ser formado em relação a esse importante aspecto.

Outro estudo que pode ser desenvolvido com o novo equipamento de fluência em geossintéticos sem necessitar de nenhuma alteração é a verificação do efeito da temperatura como fator de degradação e modificação do comportamento em fluência sob tração dos geossintéticos. Uma vez adicionado o sistema para realização de ensaios de tração, esse efeito poderá ser avaliado em termos de resistência à tração dos geossintéticos, tanto na condição confinada, como com corpos de prova em isolamento. Adicionalmente, ensaios de fluência conduzidos em temperatura ambiente após submeter os corpos de prova a temperaturas elevadas podem ser comparados com ensaios de fluência em temperatura elevada e empregados para verificar a sinergia entre a fluência e a degradação térmica dos geossintéticos. Ainda em relação aos ensaios conduzidos em temperatura elevada, recomenda-se a realização de ensaios mais longos em temperatura ambiente nas mesmas condições. Essa medida permitiria a verificação da representatividade das curvas mestras obtidas a partir dos ensaios acelerados e confinado-acelerados.

Outras investigações podem ser realizadas e dizem respeito aos materiais empregados e suas propriedades. Em primeiro lugar, recomenda-se a caracterização do atrito da interface entre o meio confinante e o geossintético para os diferentes materiais utilizados. Essa medida poderia ser utilizada como um primeiro passo para a estimativa da solicitação de tração média na faixa de interesse do corpo de prova, antes da implementação de novos elementos ao equipamento, conforme citado no item 6.3. Um segundo aspecto refere-se à densidade relativa da areia utilizada nos ensaios confinados e confinado-acelerados. O valor escolhido (45%) foi obtido através de um processo manual e empírico, que pôde ser repetido. Por esta razão, preferiu-se empregar esse valor. Contudo, ele não é representativo das condições reais encontradas em obras onde os geossintéticos são empregados com a função de reforço. Sugere-se, portanto, a utilização da areia em um estado mais compacto e que seja mais representativo das condições reais encontradas em campo. Esse parâmetro pode ser empregado, inclusive, para verificar a sua influência em relação às deformações por fluência dos geossintéticos. Por fim, propõe-se que a areia usada nesta pesquisa seja submetida a uma avaliação microscópica antes e após os ensaios de fluência. Assim, quaisquer alterações relacionadas ao formato e angularidade dos grãos poderia ser percebida.

7. Conclusões

Esta tese apresentou o novo equipamento para realização de ensaios simultaneamente confinados e acelerados de fluência em geossintéticos. O programa experimental foi conduzido em três etapas, que compreenderam a avaliação do desempenho do equipamento, do comportamento em deformação por fluência e em ruptura por fluência de amostras de geossintéticos escolhidas para incorporar os tipos mais empregados em estruturas de reforço de solo. Adicionalmente, diversos testes e verificações foram realizados com os sistemas que compõem o novo equipamento. A partir de ensaios de tração em corpos de prova previamente submetidos a ensaios de fluência, avaliou-se também a resistência residual de dois geossintéticos. As conclusões apresentadas a seguir puderam ser tomadas a partir dos ensaios realizados nesta pesquisa.

- A configuração final do equipamento apresentou desempenho satisfatório. Seu funcionamento foi avaliado inicialmente por meio de testes em cada sistema que o compõe, individualmente. Aqueles responsáveis pela manutenção de valores constantes (sistemas de aquecimento, de aplicação da solicitação de tração e de reprodução do confinamento) foram eficazes nesse aspecto. Adicionalmente, ensaios conduzidos com o GTNcurto foram utilizados para verificar o comportamento geral do equipamento, que se mostrou adequado.
- Dois aspectos do equipamento foram estudados criteriosamente. Esses aspectos estão relacionados à averiguação da distribuição das tensões normais no interior da câmara de ensaio e ao atrito entre a geomembrana de PEAD e as regiões reforçadas dos corpos de prova. Assim, pôde-se considerar estes aspectos na interpretação dos resultados obtidos nos ensaios conduzidos com o novo equipamento.
- Dois ensaios conduzidos com o GTW (geotêxtil tecido de polipropileno) em temperatura elevada (68°C) foram empregados para avaliar a repetibilidade dos resultados, que se mostrou apropriada.
- O GTW apresentou o comportamento em deformação por fluência mais sensível ao nível de carregamento entre os geossintéticos empregados nesta pesquisa. Isso pôde ser ilustrado pela variação do índice de fluência com o nível de carregamento e se deve ao tipo de polímero empregado nesse material. Por outro lado, o nível de carregamento aplicado nos ensaios com a GG-PET (geogrelha

biaxial de poliéster) exibiu a influência menos significativa nas deformações por fluência do material.

- O comportamento em deformação por fluência da GG-PET mostrou-se bastante dependente do confinamento em areia. Reduções expressivas no índice de fluência foram encontradas em temperaturas ambiente e elevada (38°C). A comparação do resultado de um único ensaio confinado de ruptura por fluência indicou que o tempo para ruptura foi afetado pelo confinamento, porém, de forma menos desejada em projeto. Assim, há indícios de que as deformação por fluência sejam afetadas pelo confinamento, apesar da contradição gerada pelo comportamento em ruptura por fluência. Sugere-se, portanto, que este material seja submetido a ensaios adicionais para esclarecer este aspecto.
- A GG-PP (geogrelha biaxial de polipropileno) foi submetida apenas a ensaios de ruptura por fluência, com corpos de prova em isolamento e em condição confinada. A partir desses resultados, percebe-se que, em confinamento, a curva de ruptura por fluência desta geogrelha sofreu uma translação horizontal em relação à posição ocupada pela curva obtida com corpos de prova em isolamento. A inclinação destas curvas foi praticamente idêntica.
- O GTW apresentou um comportamento em deformação por fluência praticamente independente do confinamento em areia, possivelmente devido a sua característica de ser altamente liso em sua superfície e entrelaçado de maneira organizada.
- As deformações por fluência do GTNcont (geotêxtil não tecido com filamentos contínuos de poliéster) e do GTNcurto (geotêxtil não tecido com fibras curtas de poliéster) apresentaram-se altamente dependentes do confinamento em areia. De fato, esses materiais exibiram comportamento em deformação por fluência com maior dependência em relação ao confinamento em areia entre os materiais estudados. O método de fabricação desses materiais levou a ocorrência de deformações por fluência mais expressivas no GTNcont e deformações iniciais maiores no GTNcurto. Por outro lado, o confinamento em areia foi responsável por uma redução similar no índice de fluência dos dois geotêxteis não tecidos, proporcional às tensões normais empregadas nos ensaios confinados.
- Todos os geossintéticos empregados em ensaios conduzidos em temperaturas elevadas apresentaram comportamento em deformação por fluência dependente da temperatura. A análise dos valores de fator de translação indicou como essa

variação ocorre. Os dois geotêxteis (GTW e GTNcont) exibiram fatores de translação variando com a temperatura de acordo com o inverso de um polinômio de primeiro grau. O fator de translação da GG-PET apresentou, por outro lado, uma variação com a temperatura representada por um polinômio de segundo grau.

- Os valores de fator de translação na condição confinada obtidos nos ensaios acelerados com o GTNcont e a GG-PET foram menores que aqueles encontrados com corpos de prova em isolamento. Assim, a condição confinada em ensaios em temperatura elevada produziu uma extensão maior no tempo fictício (duração do ensaio caso este fosse executado na temperatura de referência). Os ensaios realizados com o GTW, por sua vez, apresentaram o comportamento oposto.
- A GG-PET e o GTW apresentaram redução de resistência devido às deformações por fluência praticamente inexpressiva. Os valores de resistência residual dos corpos de prova submetidos aos ensaios de fluência em diversas condições de confinamento e temperatura apresentaram-se similares à resistência dos geossintéticos obtida por meio de ensaios de tração.

Embora o novo equipamento de fluência em geossintético tenha apresentado um comportamento satisfatório, algumas sugestões são feitas a partir do programa experimental relatado nesta tese. Essas sugestões dizem respeito a própria configuração do equipamento e a pesquisas futuras. Os aspectos mostrados a seguir referem-se àqueles que podem ser implementados no novo equipamento.

- Melhoria do sistema de aplicação do carregamento para permitir a utilização por um único operador e a aplicação da solicitação de tração em uma taxa constante. Esse sistema permitiria, também, a realização de ensaios de tração no novo equipamento e, portanto, poderiam ser reproduzidas quaisquer condições relacionadas ao confinamento e à temperatura.
- Redução do atrito na região reforçada dos corpos de prova por meio da utilização de mangas metálicas.
- Medição da solicitação de tração e do alongamento na faixa de interesse dos corpos de prova. Como medida mais simples de ser adotada, a determinação do atrito da interface entre o meio confinante e os geossintéticos permitiria a obtenção de uma estimativa da solicitação de tração média na faixa de interesse dos corpos de prova.

- Sistema contra interrupções no fornecimento de energia elétrica.
- Elevação da resistência nominal dos cabos de aço e suas conexões para permitir a realização de ensaios com carregamento maiores.

A continuidade desta pesquisa é essencial para esclarecer um dos aspectos mais importantes no projeto de estruturas onde os geossintéticos possuem a função de reforço. Assim, foram sugeridos estudos subsequentes para aprofundar o entendimento do comportamento em fluência dos geossintéticos avaliados. Adicionalmente, outros aspectos podem ser investigados. Alguns deles necessitam de adaptações maiores no novo equipamento, para que os requisitos técnicos aplicáveis sejam contemplados, enquanto outros podem ser iniciados com a configuração atual. Os ensaios adicionais e os estudos subsequentes propostos nesta tese são brevemente descritos a seguir.

- Ensaios convencionais de fluência no novo equipamento para verificar a correspondência com aqueles obtidos com aparato normalizado.
- Ensaios confinados de fluência em diferentes níveis de tensão vertical para verificar a dependência que as deformações por fluência apresentam em relação a esse parâmetro.
- Ensaios confinados de fluência em vários níveis de carregamento para avaliar a variação do índice de fluência com esse parâmetro. Assim, o comportamento de diversos tipos de geossintéticos em fluência sob condições confinadas pode ser comparado.
- Execução de ensaios confinados de ruptura por fluência em diversos tipos de geossintéticos e, assim, comprovar a translação da curva de ruptura por fluência.
- Melhoria do equipamento para realização de ensaios confinados de tração e, a partir deles, realizar os ensaios confinados de fluência com carregamentos relacionados aos valores de resistência obtidos nesses ensaios. Esse aspecto não precisa referir-se apenas ao confinamento. De fato, sugere-se que os ensaios de tração reproduzam as condições desejadas para os ensaios de fluência (temperatura e confinamento) e, assim, o nível de carregamento possa ser calculado como uma parcela da resistência do material na mesma condição.
- Verificação do efeito de degradação através da temperatura, tanto em ensaios de fluência como em ensaios de tração. Sugere-se, também, estudar a sinergia entre a fluência e a degradação térmica dos geossintéticos.

- Realização de ensaios simultaneamente confinados e acelerados de relaxação em geossintéticos a partir da implementação de um sistema que mantenha uma deformação constante no geossintético enquanto a solicitação de tração é registrada ao longo do tempo.
- Ensaios de fluência mais longos em temperatura ambiente para comprovação das curvas mestras obtidas nas condições confinada e em isolamento.
- Avaliação da influência da densidade relativa da areia utilizada como meio confinante em relação às deformações por fluência dos geossintéticos. Sugere-se, inclusive, que os estudos sejam realizados com valores de densidade relativa mais elevados, de maneira a representar melhor as condições encontradas em situações reais de obras.
- Verificação do formato e angularidade dos grãos da areia empregada como meio confinante antes e após os ensaios de fluência através de análises microscópicas.

REFERÊNCIAS¹

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.

_____. **NBR 12004**: solo: determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12051**: solo: determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12824**: geotêxteis: determinação da resistência à tração não confinadas: ensaio de tração de faixa larga. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 15226**: geossintéticos: determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada. Rio de Janeiro, 2005.

AGAR, J. G.; MORGENSTERN, N. R.; SCOTT, J. D. Shear strength and stress-strain behaviour of Athabasca oil sand at elevated temperatures and pressures. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 24, n. 1, p. 1-10, 1987.

ALAWAJI, H. A. Creep and rate of loading effects on geogrid-reinforced sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 23, n. 5, p. 583-600, set. 2005

ALLEN, T. M. Determination of long-term strength of geosynthetics: A state-of-the-art review. In: GEOSYNTHETICS'91, 1991, Atlanta, **Proceedings...** Atlanta: International Geosynthetic Society, 1991. p. 351-379.

¹De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

ANDRAWES, K. Z.; MCGOWN, A.; KABIR, M. H. Uniaxial strength testing of woven and nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 1, n. 1, p. 41-56, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3080**: standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, 2004.

_____. **D 4595**: standard test method for tensile properties of geotextiles by the wide-width strip method. West Conshohocken, 2005.

_____. **D 5199**: standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics. West Conshohocken, 2006.

_____. **D 5261**: standard test method for measuring mass per unit area of geotextiles. West Conshohocken, 2003.

_____. **D 5262**: standard test method for evaluating the unconfined tension creep and creep rupture behavior of geosynthetics. West Conshohocken, 2007.

_____. **D 6637**: standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method. West Conshohocken, 2001.

_____. **D 6992**: standard test method for accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method. West Conshohocken, 2003.

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

BARAS, L. C. S.; BUENO, B. S.; COSTA, C. M. L. On the evaluation of stepped isothermal method for characterizing creep properties of geotextiles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: International Geosynthetic Society, 2002. p. 1515-1518.

BECKER, L. D. B.; NUNES, A. L. L. S. Confined creep of geotextile in a compacted sand fill. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: International Geosynthetic Society, 2002. p. 1519-1522.

BENJAMIM, C. V. S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil.** 2006. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BUENO, B. S.; CONSTANZI, M. A.; ZORNBERG, J. G. Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles. **Geosynthetics International**, v. 12, n. 6, p. 276-287, dez. 2005.

CAZZUFFI, D. et al. European experimental approach to the tensile creep behavior of high-strength geosynthetics. In: GEOSYNTHETICS '97, 1997, Atlanta, **Proceedings...** Atlanta: International Geosynthetic Society, 1997. p. 253-266.

CONSTANZI, M. A. **Emprego do método SIM para obtenção das curvas isócronas e de ruptura por fluência.** 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CONSTANZI, M. A. et al.. Avaliação da fluência de geotêxteis não tecidos com ensaios acelerados. **Solos e Rochas**, v. 26, n. 3, set. 2003.

COSTA, C. M. L. **Fluência de geotêxteis.** 1999. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

COSTA, C. M. L. **Deformações dependentes do tempo em muros de solo reforçado com geotêxteis.** 2004. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DEAN, G. D.; BROUGHTON, W. A model for non-linear creep in polypropylene. **Polymer Testing**, v. 26, n. 8, p. 1068-1081, dez. 2007.

Den HOEDT, G. Creep and relaxation of geotextiles fabrics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 4, n. 2, p. 83-92, 1986.

DING, J.; TONG, J.; ZHOU, W. Test study on the confined creep features of HDPE geogrid in sand. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 4., 2008, Edinburgh, **Proceedings...** Edinburgh: UK Chapter of the International Geosynthetics Society, 2008.

FARRAG, K.; SHIRAZI, H. Development of an accelerated creep testing procedure for geosynthetics – Part 1: Testing. **Geotechnical Testing Journal**, v. 20, n. 4, p. 414-422, dez. 1997.

FARRAG, K. Development of an accelerated creep testing procedure for geosynthetics – Part 2: Analysis. **Geotechnical Testing Journal**, v. 21, n. 1, p.38-44, mar. 1998.

FARRAG, K. Prediction of long-term strains of geosynthetics from accelerated-creep tests. In: GEOSYNTHETICS '97, 1997, Atlanta, **Proceedings...** Atlanta: International Geosynthetic Society, 1997. p. 267-276.

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980. 641p.

FREITAS NETO, O. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GRAHAM, J.; ALFARO, M.; FERRIS, G. Compression and strength of dense sand at high pressures and elevated temperature. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 41, n. 6, p. 1206-1212, 2004.

GREENWOOD, J. H. et al. Twelve year creep tests on geosynthetic reinforcements. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 2., 2000, Bologna, **Proceedings...** Bologna: Italian Chapter of the International Geosynthetics Society, 2000.

HELWANY, S. M. B.; SHIH, S. Creep and stress relaxation of geotextile-reinforced soils. **Geosynthetics International**, v. 5, n. 4, p. 425-434, 1998.

HIRAKAWA, D. et al. Time-dependent deformation of geosynthetics and geosynthetics-reinforced soil structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: International Geosynthetic Society, 2002. p. 1527-1430.

HIRAKAWA, D. et al. Time-dependent stress-strain behavior due to viscous properties of geogrid reinforcement. **Geosynthetics International**, v. 10, n. 6, p. 176-199, 2003.

HSIEH, C.; LEE, I.; TAIN, Y. Creep strains of high strength polyester geogrids measured by conventional and accelerated test methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1581-1586.

HSUAN, Y. G.; YEO, S-S. Comparing the creep behavior of high density polyethylene geogrid using two acceleration methods. **Slopes and Retaining Structures under Seismic and Static Conditions – ASCE Geotechnical Special Publication No. 140**, Austin, jan. (CD-ROM), 2005.

HULSE, I.C.; PHILLIPS, P. Long-term performance of non-woven geotextile wraparound walls. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: International Geosynthetic Society, 2002. p. 1527-1530.

JEON, H. Y.; KIM, S. H.; YOO, H. K. Assessment of long-term performances of polyester geogrids by accelerated creep test. **Polymer Testing**, v. 21, n. 5, p. 489-495, 2002.

JEON, H. Y. et al. Evaluation of the long-term performance of geosynthetic reinforcement from their reduction factors. **Polymer Testing**, v. 25, n. 3, p. 289-295, 2006.

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

JONES, C. J. F . P.; CLARKE, D. The residual strength of geosynthetic reinforcement subjected to accelerated creep testing and simulated seismic events. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, n. 3, p. 155-169, jun. 2007.

KAKUDA, F. M. **Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de um equipamento reduzido**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

KAMIJI, T. S. M. M. **Fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KAMIJI, T.; BUENO, B.; COSTA, C. Nonwoven geotextiles: Evaluation of behaviour in confined creep tests. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 4., 2008, Edinburgh, **Proceedings...** Edinburgh: UK Chapter of the International Geosynthetics Society, 2008.

KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K. Deformations of model reinforced-soil retaining walls due to creep and reinforcement pullout. **Geosynthetics International**, v. 10, n. 5, p. 153-163, 2003.

KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K. Correlation between the results of creep and relaxation tests of geotextiles. **Geosynthetics International**, v. 12, n. 5, p. 269-275, 2005.

KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K Creep properties of geosynthetics during increasing loading and after partial unloading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1605-1608.

KOERNER, R. M.; LORD JR., A. E.; HALSE, Y. H. Long-term durability and aging of geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, n. 1-2, p. 147-158, 1988.

KOERNER, R. M.; LORD JR., A. E.; HSUAN, Y. H. Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 11, n. 2, p. 151-183, 1992.

KOERNER, R. et al. Creep testing and data extrapolation of reinforced GCLs. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, n. 7, p. 413-425, set. 2001.

KOERNER, R.. M. **Designing with geosynthetics**. 5. ed. Upper Sadle River: Prentice-Hall, 2005. 796p

KONGKITKUL, W. et al. Viscous deformation of geosynthetic reinforcement under cyclic loading conditions and its model simulation. **Geosynthetics International**, v. 11, n. 2, p. 73-99, 2004.

KONGKITKUL, W.; TATSUOKA, F. A theoretical framework to analyze the behavior of polymer geosynthetic reinforcement in temperature-accelerated creep tests. **Geosynthetics International**, v. 14, n. 1, p. 23-38, 2007.

KONGKITKUL, W.; TATSUOKA, F.; HIRAKAWA, D. Creep rupture curve for simultaneous creep deformation and degradation of geosynthetic reinforcement. **Geosynthetics International**, v. 14, n. 4, p. 189-200, 2007.

LESHCHINSKY, D. et al. Creep and stress relaxation of geogrids. **Geosynthetics International**, v. 4, n. 5, p. 463-479, 1997.

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

MCGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; KABIR, M. H. Load-extension testing of geotextiles confined in-soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, 2., 1982, Las Vegas, **Proceedings...** Las Vegas, 1982. p. 793-798.

MENDES, M. J. A.; PALMEIRA, E. M. Efeitos da impregnação na rigidez de geotêxteis não tecidos em ensaios de tração confinada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 5., 2007, Recife, **Proceedings...** Recife: Associação Brasileira de Geossintéticos, 2007.

MERRY, S. M.; BRAY, J. D.; YOSHITOMI, S. Axisymmetric temperature- and stress-dependent creep response of “new” and “old” HDPE geomembranes. **Geosynthetics International**, v. 12, n. 3, p. 156-161, 2005.

MIN, Y. et al. Effects of sustained and repeated tensile loads on geogrids embedded in sand. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 2, p. 204-225, jun. 1995.

NAUGHTON, P. J.; KEMPTON, G. T. Life-time assessment of polyester based geosynthetics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1577-1580.

PAULA, A. M.; PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L. Combined effect of damage during installation and long-term mechanical behavior of geosynthetics. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 4., 2008, Edinburgh, **Proceedings...** Edinburgh: UK Chapter of the International Geosynthetics Society, 2008.

PERKINS, S. W. Constitutive modeling of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, n. 5, p. 273-292, out. 2000.

RECKER, C.; STAUBERMANN, C.; ALTHOFF, S. The memory of geosynthetics during creep. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 4., 2008, Edinburgh, **Proceedings...** Edinburgh: UK Chapter of the International Geosynthetics Society, 2008.

RIMOLDI, P.; MONTANELLI, F. Creep and accelerated creep testing for geogrids. In: GEOSYNTHETICS '93, 1993, Vancouver, **Proceedings...** Vancouver: International Geosynthetic Society, 1993. p. 773-787.

ROSCOE, R. Mechanical models for the representation of visco-elastic properties. **British Journal of Applied Physics**, v. 1, p. 171-173, jun. 1950.

SANDSTRÖN, R.; LINDÉ, R. Precision in the extrapolation of creep rupture data. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 27, n. 3, p. 203-210, maio. 1999.

SAWICKI, A.; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K. Creep behavior of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, n. 6, p. 365-382, dez. 1998.

SAWICKI, A. Rheological model of geosynthetic-reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 17, n. 1, p. 33-49, fev. 1999.

SCAFFARO, R.; DINTCHEVA, N. T.; LA MANTIA, F. P. A new equipment to measure the combined effects of humidity, temperature, mechanical stress and UV exposure on the creep behavior of polymers. **Polymer Testing**, v. 27, n. 1, p. 49-54, 2008.

SEEGER, S.; MÜLLER, W.; MOHR, K. Long term tensile testing of polyolefin fibers in geotextiles. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: International Geosynthetic Society, 2002. p. 1459-1462.

SEGRESTIN, P.; FREITAG, N. Opinions about creep rupture in soil reinforcement design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1595-1598.

SHINODA, M.; BATHURST, R. J. Lateral and axial deformation of PP, HDPE and PET geogrids under tensile load. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 22, n. 4, p. 205-222, ago. 2004a.

SHINODA, M.; BATHURST, R. J. Strain measurement of geogrids using a video-extensometer technique. **Geotechnical Testing Journal**, v. 27, n. 5, p. 456-463, set. 2004b.

SIMONINI, P.; GOTTARDI, G. The viscoplastic behavior of a geogrid-reinforced model wall. **Geosynthetics International**, v. 10, n. 1, p. 34-46, 2003.

TATSUOKA, F.; KONGKITKUL, W.; HIRAKAWA, D. Viscous property and time-dependent degradation of geosynthetic reinforcement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1587-1590.

THORNTON, J. S.; ALLEN, S. R.; THOMAS, R. W. Approaches for the prediction of long term viscoelastic properties of geosynthetics from short term tests. In: GEOSYNTHETICS '97, 1997, Atlanta, **Proceedings...** Atlanta: International Geosynthetic Society, 1997. p. 277-291.

THORNTON, J. S. et al. The Stepped Isothermal Method for Time-Temperature Superposition and its Application to Creep Data on Polyester Yarn. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 6., 1998, Atlanta, **Proceedings...** Atlanta: Industrial Fabrics Association, 1998. p. 699-706.

THORNTON, J. S.; BAKER, T. L. Comparison of SIM and conventional methods for determining creep-rupture behavior of a polypropylene geotextile. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 7., 2002, Nice, **Proceedings...** Nice: International Geosynthetic Society, 2002. p. 1545-1550

TRENTINI, R. S.; VIDAL, D.; MARTINS, P. M. Chemical ageing and creep analysis – influence of synergy and test specimen preparation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1609-1612.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. **Journal of the American Chemical Society**, v. 77, n. 14, p. 3701-3707, jul. 1955.

WRIGLEY, N. E.; LIU, W.; WANG, H. A comparison of different techniques for determining the tensile and creep strength and creep reduction factor of a geogrid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1591-1594.

YEO, S-S.; HSUAN, Y. G. Evaluation of stepped isothermal method using two types of geogrids. In: EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 4., 2008, Edinburgh, **Proceedings...** Edinburgh: UK Chapter of the International Geosynthetics Society, 2008.

YUU, J. J.; JEON, H-Y.; LEE, J. Y. Analytical approach to determine long-term creep behaviors of geosynthetic reinforcements by strain compatibility. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 8., 2006, Yokohama, **Proceedings...** Yokohama: International Geosynthetic Society, 2006. p. 1613-1616.

ZORNBERG, J. G.; BYLER, B. R.; KNUDSEN, J. W. Creep of geotextiles using time-temperature superposition methods. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 11, p. 1158-1168, nov. 2004.

APÊNDICE A: Informações sobre os ensaios de fluência conduzidos nesta pesquisa

Geogrelha de polipropileno (GG-PP)

Ensaio conduzidos no sentido longitudinal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação desejada (%) ¹	Duração (h)	Temperatura desejada (°C)	Confinamento	Tração ²
1	GG-PP-1	F _{rup}	60	29,455	Ambiente	---	---
2	GG-PP-2	F _{rup}	70	1,198	Ambiente	---	---
3	GG-PP-3	F _{rup}	80	0,184	Ambiente	---	---
4	GG-PP-4	F _{rup}	80	7,732	Ambiente	---	---
5	GG-PP-5	F _{rup}	90	0,184	Ambiente	---	---
6	GG-PP-6	F _{rup}	90	0,217	Ambiente	---	---
7	GG-PP-7	FC _{rup}	60	942,258	Ambiente	50 kPa - Areia	---
8	GG-PP-8	FC _{rup}	70	317,059	Ambiente	50 kPa - Areia	---
9	GG-PP-9	FC _{rup}	80	27,051	Ambiente	50 kPa - Areia	---
10	GG-PP-10	FC _{rup}	90	10,453	Ambiente	50 kPa - Areia	---

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637).

²Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geogrelha de poliéster (GG-PET)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação (parte 1)

Nº	Designação	Tipo	Solicitação desejada (%) ¹	Duração (h)	Temperatura desejada (°C)	Confinamento	Tração ²
11	GG-PET-1	F	20	10,008	Ambiente	---	Sim
12	GG-PET-2	F	30	10,008	Ambiente	---	Sim
13	GG-PET-3	F	30	10,008	Ambiente	---	Sim
14	GG-PET-4	F	40	10,008	Ambiente	---	Sim
15	GG-PET-5	F	50	10,008	Ambiente	---	Sim
16	GG-PET-6	F	50	10,016	Ambiente	---	Sim
17	GG-PET-7	F	50	10,252	Ambiente	---	Sim
18	GG-PET-8	F	60	10,008	Ambiente	---	Sim
19	GG-PET-9	F	70	10,008	Ambiente	---	Sim
20	GG-PET-10	F	80	10,008	Ambiente	---	Sim
21	GG-PET-11	F _{rup}	85	1,106	Ambiente	---	---
22	GG-PET-12	F _{rup}	85	1,011	Ambiente	---	---
23	GG-PET-13	F _{rup}	85	1,345	Ambiente	---	---
24	GG-PET-14	F _{rup}	87,5	0,579	Ambiente	---	---
25	GG-PET-15	F _{rup}	87,5	0,314	Ambiente	---	---
26	GG-PET-16	F _{rup}	87,5	0,541	Ambiente	---	---
27	GG-PET-17	F _{rup}	87,5	0,676	Ambiente	---	---
28	GG-PET-18	F _{rup}	87,5	0,927	Ambiente	---	---
29	GG-PET-19	F _{rup}	90	0,074	Ambiente	---	---
30	GG-PET-20	F _{rup}	90	0,073	Ambiente	---	---

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637).

²Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geogrelha de poliéster (GG-PET)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação (parte 2)

Nº	Designação	Tipo	Solicitação desejada (%) ¹	Duração (h)	Temperatura desejada (°C)	Confinamento	Tração ²
31	GG-PET-21	F _{rup}	90	0,064	Ambiente	---	---
32	GG-PET-22	F _{rup}	92,5	0,045	Ambiente	---	---
33	GG-PET-23	F _{rup}	92,5	0,037	Ambiente	---	---
34	GG-PET-24	F _{rup}	92,5	0,047	Ambiente	---	---
35	GG-PET-25	F _{rup}	95	0,024	Ambiente	---	---
36	GG-PET-26	F _{rup}	95	0,037	Ambiente	---	---
37	GG-PET-27	F _{rup}	95	0,028	Ambiente	---	---
38	GG-PET-28	F _{rup}	97,5	0,019	Ambiente	---	---
39	GG-PET-29	F _{rup}	97,5	0,016	Ambiente	---	---
40	GG-PET-30	F _{rup}	97,5	0,016	Ambiente	---	---
41	GG-PET-31	FA	50	96,737	60	---	Sim
42	GG-PET-32	FA	50	13,352	60	---	---
43	GG-PET-33	FA	50	15,214	45	---	Sim
44	GG-PET-34	FC	50	21,873	Ambiente	50 kPa - Areia	---
45	GG-PET-35	FC	50	15,811	Ambiente	50 kPa - Areia	---
46	GG-PET-36	FC	50	66,510	Ambiente	50 kPa - Solo	Sim
47	GG-PET-37	FC _{rup}	90	1,384	Ambiente	50 kPa - Areia	---
48	GG-PET-38	FCA	50	22,237	45	50 kPa - Areia	---

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637).

²Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geotêxtil tecido de poliéster (GTW)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação desejada (%) ¹	Duração (h)	Temperatura desejada (°C)	Confinamento	Tração ²
49	GTW-1	F	20	10,017	Ambiente	---	Sim
50	GTW-2	F	30	10,017	Ambiente	---	Sim
51	GTW-3	F	40	10,017	Ambiente	---	Sim
52	GTW-4	F	50	10,017	Ambiente	---	Sim
53	GTW-5	F	60	10,017	Ambiente	---	Sim
54	GTW-6	F	70	10,017	Ambiente	---	Sim
55	GTW-7 ³	F	70	8,983	Ambiente	---	---
56	GTW-8	F	80	1,693	Ambiente	---	---
57	GTW-9	FA	30	25,229	40	---	Sim
58	GTW-10	FA	30	4,990	60	---	Sim
59	GTW-11	FA	30	18,620	60	---	Sim
60	GTW-12	FC	30	168,084	Ambiente	50 kPa - Areia	Sim
61	GTW-13	FCA	30	143,007	40	50 kPa - Areia	---

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637).

²Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

³Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação do geossintético.

Geotêxtil não tecido de poliéster, filamentos contínuos (GTNcont)

Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação desejada (%) ¹	Duração (h)	Temperatura desejada (°C)	Confinamento	Tração ²
62	GTNcont-1	F	20	1314,920	Ambiente	---	---
63	GTNcont-2	F	30	1013,300	Ambiente	---	---
64	GTNcont-3	F	40	1079,420	Ambiente	---	---
65	GTNcont-4	F	50	1008,400	Ambiente	---	---
66	GTNcont-5	F	60	1319,350	Ambiente	---	---
67	GTNcont-6	FA	60	90,238	40	---	---
68	GTNcont-7	FA	60	165,016	60	---	---
69	GTNcont-8	FC	60	36,574	Ambiente	50 kPa - Areia	---
70	GTNcont-9	FCA	60	206,029	40	50 kPa - Areia	---
71	GTNcont-10	FCA	60	15,586	60	50 kPa - Areia	---

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637).

²Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geotêxtil não tecido de poliéster, fibras curtas (GTNcurto)

Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação desejada (%) ¹	Duração (h)	Temperatura desejada (°C)	Confinamento	Tração ²
72	GTNcurto-1	F	20	100,00	Ambiente	---	---
73	GTNcurto-2	FC	20	113,73	Ambiente	30 kPa - Areia	---
74	GTNcurto-3	FCA	20	111,84	50	30 kPa - Areia	---

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637).

²Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

APÊNDICE B – Solicitação de tração e temperatura atingidas nos ensaios conduzidos nesta pesquisa

Geogrelha de polipropileno (GG-PP)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação atingida na faixa de interesse dos corpos de prova (%) ¹	Temperatura atingida (°C) ²
1	GG-PP-1	F _{rup}	58,70 (0,03%)	Ambiente
2	GG-PP-2	F _{rup}	68,48 (0,04%)	Ambiente
3	GG-PP-3	F _{rup}	78,27 (0,05%)	Ambiente
4	GG-PP-4	F _{rup}	79,26 (0,13%)	Ambiente
5	GG-PP-5	F _{rup}	87,93 (0,06%)	Ambiente
6	GG-PP-6	F _{rup}	89,17 (0,09%)	Ambiente
7	GG-PP-7	FC _{rup}	48,46 (0,97%)	Ambiente
8	GG-PP-8	FC _{rup}	58,55 (1,35%)	Ambiente
9	GG-PP-9	FC _{rup}	68,59 (1,15%)	Ambiente
10	GG-PP-10	FC _{rup}	77,58 (0,85%)	Ambiente

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637). Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio.

²Temperatura não mensurada.

Geogrelha de poliéster (GG-PET)

Ensaio conduzidos no sentido longitudinal de fabricação (parte 1)

Nº	Designação	Tipo	Solicitação atingida na faixa de interesse dos corpos de prova (%) ¹	Temperatura atingida (°C) ²
11	GG-PET-1	F	20,00 (0,06%)	26,30 (6,45%)
12	GG-PET-2	F	30,00 (0,03%)	25,00 (7,92%)
13	GG-PET-3	F	30,00 (0,04%)	Ambiente
14	GG-PET-4	F	40,00 (0,03%)	24,95 (2,55%)
15	GG-PET-5	F	50,00 (0,02%)	24,45 (2,02%)
16	GG-PET-6	F	50,24 (0,05%)	26,65 (9,29%)
17	GG-PET-7	F	50,24 (0,02%)	27,90 (9,63%)
18	GG-PET-8	F	60,00 (0,02%)	25,10
19	GG-PET-9	F	70,00 (0,02%)	26,50 (8,54%)
20	GG-PET-10	F	80,00 (0,01%)	26,95 (2,89%)
21	GG-PET-11	F _{rup}	85,00 (0,02%)	26,10
22	GG-PET-12	F _{rup}	85,00 (0,01%)	26,40
23	GG-PET-13	F _{rup}	85,00 (0,01%)	26,90
24	GG-PET-14	F _{rup}	87,50 (0,02%)	25,30
25	GG-PET-15	F _{rup}	87,50 (0,02%)	28,10
26	GG-PET-16	F _{rup}	87,50 (0,02%)	28,10
27	GG-PET-17	F _{rup}	87,50 (0,02%)	25,50
28	GG-PET-18	F _{rup}	87,50 (0,01%)	25,30
29	GG-PET-19	F _{rup}	90,00 (0,02%)	25,80
30	GG-PET-20	F _{rup}	90,00 (0,01%)	25,90

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637). Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio.

²A identificação “Ambiente” indica os ensaios nos quais a temperatura não foi mensurada. Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio. Nos casos em que apenas uma leitura foi tomada, omite-se o valor entre parênteses.

Geogrelha de poliéster (GG-PET)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação (parte 2)

Nº	Designação	Tipo	Solicitação atingida na faixa de interesse dos corpos de prova (%) ¹	Temperatura atingida (°C) ²
31	GG-PET-21	F _{rup}	90,00 (0,01%)	25,30
32	GG-PET-22	F _{rup}	92,50 (0,02%)	25,30
33	GG-PET-23	F _{rup}	92,49 (0,04%)	25,30
34	GG-PET-24	F _{rup}	92,50 (0,01%)	25,30
35	GG-PET-25	F _{rup}	94,99 (0,06%)	25,30
36	GG-PET-26	F _{rup}	95,00 (0,02%)	25,30
37	GG-PET-27	F _{rup}	95,00 (0,01%)	25,30
38	GG-PET-28	F _{rup}	97,54 (0,06%)	25,40
39	GG-PET-29	F _{rup}	97,59 (0,03%)	25,40
40	GG-PET-30	F _{rup}	97,55 (0,02%)	25,40
41	GG-PET-31	FA	49,79 (0,39%)	60,72 (1,09%)
42	GG-PET-32	FA	48,88 (1,50%)	63,07 (1,01%)
43	GG-PET-33	FA	50,27 (0,91%)	43,03 (0,79%)
44	GG-PET-34	FC	46,48 (1,03%)	23,51 (0,78%)
45	GG-PET-35	FC	46,16 (1,42%)	24,56 (0,88%)
46	GG-PET-36	FC	46,67 (1,24%)	22,50 (0,67%)
47	GG-PET-37	FC _{rup}	81,44 (0,85%)	22,80 (0,00%)
48	GG-PET-38	FCA	46,54 (1,53%)	44,10 (0,35%)

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637). Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio.

²Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio. Nos casos em que apenas uma leitura foi tomada, omite-se o valor entre parênteses.

Geotêxtil tecido de poliéster (GTW)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação atingida na faixa de interesse dos corpos de prova (%) ¹	Temperatura atingida (°C) ²
49	GTW-1	F	20,00 (0,04%)	27,25 (3,37%)
50	GTW-2	F	30,00 (0,02%)	25,60 (9,39%)
51	GTW-3	F	40,00 (0,02%)	26,15 (9,46%)
52	GTW-4	F	50,00 (0,02%)	27,45 (8,50%)
53	GTW-5	F	60,00 (0,01%)	24,95 (11,62%)
54	GTW-6	F	70,00 (0,01%)	25,65 (1,93%)
55	GTW-7 ³	F	67,08 (0,03%)	24,75 (9,43%)
56	GTW-8	F	80,00 (0,06%)	26,65 (1,33%)
57	GTW-9	FA	29,21 (1,37%)	38,21 (0,37%)
58	GTW-10	FA	29,29 (3,50%)	61,59 (0,63%)
59	GTW-11	FA	28,10 (4,55%)	62,36 (0,89%)
60	GTW-12	FC	27,31 (0,76%)	22,80 (1,15%)
61	GTW-13	FCA	27,41 (1,30%)	38,65 (0,79%)

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637). Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio.

²Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio. Nos casos em que apenas uma leitura foi tomada, omite-se o valor entre parênteses.

³Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação do geossintético.

Geotêxtil não tecido de poliéster, filamentos contínuos (GTNcont)

Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação atingida na faixa de interesse dos corpos de prova (%) ¹	Temperatura atingida (°C) ²
62	GTNcont-1	F	20,01 (0,00%)	21,67 (5,55%)
63	GTNcont-2	F	30,01 (0,00%)	22,49 (2,73%)
64	GTNcont-3	F	40,02 (0,00%)	22,44 (3,74%)
65	GTNcont-4	F	49,99 (0,00%)	21,40 (6,93%)
66	GTNcont-5	F	59,99 (0,00%)	21,59 (7,48%)
67	GTNcont-6	FA	61,16 (1,54%)	38,54 (1,01%)
68	GTNcont-7	FA	60,47 (1,81%)	58,28 (0,88%)
69	GTNcont-8	FC	50,39 (1,27%)	23,91 (1,01%)
70	GTNcont-9	FCA	51,18 (3,15%)	38,21 (0,33%)
71	GTNcont-10	FCA	49,65 (1,04%)	57,29 (0,53%)

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637). Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio.

²Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio. Nos casos em que apenas uma leitura foi tomada, omite-se o valor entre parênteses.

Geotêxtil não tecido de poliéster, fibras curtas (GTNcurto)

Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Solicitação atingida na faixa de interesse dos corpos de prova (%) ¹	Temperatura atingida (°C) ²
72	GTNcurto-1	F	20,00 (0,00%)	23,01 (2,71%)
73	GTNcurto-2	FC	15,16 (1,39%)	21,91 (1,29%)
74	GTNcurto-3	FCA	14,90 (1,52%)	49,35 (0,93%)

¹Solicitação de tração referente a uma porcentagem da resistência a tração do geossintético (ASTM D 6637). Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio.

²Os valores entre parênteses indicam os coeficientes de variação calculados a partir de todos os registros do respectivo ensaio. Nos casos em que apenas uma leitura foi tomada, omite-se o valor entre parênteses.

APÊNDICE C – Índice de fluência, deformação inicial e resultados dos ensaios de tração após períodos de fluência obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa

Geogrelha de polipropileno (GG-PP)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Deformação inicial (%)	Índice de fluência	Ensaio de tração após fluência ¹	
					Resistência (kN/m)	Deformação (%)
1	GG-PP-1	F _{rup}	3,408	1,803	---	---
2	GG-PP-2	F _{rup}	4,857	3,440	---	---
3	GG-PP-3	F _{rup}	7,290	7,735	---	---
4	GG-PP-4	F _{rup}	5,633	3,554	---	---
5	GG-PP-5	F _{rup}	5,394	3,416	---	---
6	GG-PP-6	F _{rup}	8,100	6,858	---	---
7	GG-PP-7	FC _{rup}	0,886	0,388	---	---
8	GG-PP-8	FC _{rup}	2,928	0,809	---	---
9	GG-PP-9	FC _{rup}	4,171	0,711	---	---
10	GG-PP-10	FC _{rup}	0,411	1,231	---	---

¹Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geogrelha de poliéster (GG-PET)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação (parte 1)

Nº	Designação	Tipo	Deformação inicial (%)	Índice de fluência	Ensaio de tração após fluência ¹	
					Resistência (kN/m)	Deformação (%)
11	GG-PET-1	F	1,903	0,159	36,51	8,821
12	GG-PET-2	F	3,251	0,290	36,65	6,387
13	GG-PET-3	F	3,234	0,249	36,40	6,819
14	GG-PET-4	F	4,882	0,183	37,70	5,885
15	GG-PET-5	F	6,364	0,243	36,73	3,684
16	GG-PET-6	F	6,183	0,201	37,40	10,778
17	GG-PET-7	F	6,834	0,196	35,93	9,867
18	GG-PET-8	F	7,550	0,270	37,47	3,652
19	GG-PET-9	F	8,234	0,388	37,13	1,851
20	GG-PET-10	F	9,323	0,510	38,56	0,703
21	GG-PET-11	F _{rup}	10,084	0,578	---	---
22	GG-PET-12	F _{rup}	9,975	0,628	---	---
23	GG-PET-13	F _{rup}	9,794	0,627	---	---
24	GG-PET-14	F _{rup}	10,094	0,817	---	---
25	GG-PET-15	F _{rup}	10,089	0,849	---	---
26	GG-PET-16	F _{rup}	9,851	0,829	---	---
27	GG-PET-17	F _{rup}	10,327	0,656	---	---
28	GG-PET-18	F _{rup}	1,903	0,159	---	---
29	GG-PET-19	F _{rup}	3,251	0,290	---	---
30	GG-PET-20	F _{rup}	3,234	0,249	---	---

¹Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geogrelha de poliéster (GG-PET)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação (parte 2)

Nº	Designação	Tipo	Deformação inicial (%)	Índice de fluência	Ensaio de tração após fluência ¹	
					Resistência (kN/m)	Deformação (%)
31	GG-PET-21	F _{rup}	10,470	0,526	---	---
32	GG-PET-22	F _{rup}	10,154	1,174	---	---
33	GG-PET-23	F _{rup}	10,633	0,898	---	---
34	GG-PET-24	F _{rup}	10,536	0,969	---	---
35	GG-PET-25	F _{rup}	10,802	1,403	---	---
36	GG-PET-26	F _{rup}	10,795	1,334	---	---
37	GG-PET-27	F _{rup}	11,095	1,970	---	---
38	GG-PET-28	F _{rup}	11,349	3,081	---	---
39	GG-PET-29	F _{rup}	11,551	1,561	---	---
40	GG-PET-30	F _{rup}	11,115	3,552	---	---
41	GG-PET-31	FA	11,014	5,838	38,44	9,190
42	GG-PET-32	FA	11,779	11,677	---	---
43	GG-PET-33	FA	11,561	8,985	37,26	8,825
44	GG-PET-34	FC	5,573	0,705	---	---
45	GG-PET-35	FC	6,308	0,482	---	---
46	GG-PET-36	FC	8,391	0,330	36,40	8,161
47	GG-PET-37	FC _{rup}	7,018	0,003	---	---
48	GG-PET-38	FCA	5,040	0,014	---	---

¹Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geotêxtil tecido de poliéster (GTW)

Ensaio conduzido no sentido longitudinal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Deformação inicial (%)	Índice de fluência	Ensaio de tração após fluência ¹	
					Resistência (kN/m)	Deformação (%)
49	GTW-1	F	2,429	0,897	53,32	8,738
50	GTW-2	F	3,163	1,217	48,99	6,111
51	GTW-3	F	4,777	1,654	45,76	4,222
52	GTW-4	F	5,819	1,865	49,45	3,887
53	GTW-5	F	6,282	2,018	52,56	3,511
54	GTW-6	F	7,421	2,369	53,03	2,104
55	GTW-7 ²	F	9,61	2,949	---	---
56	GTW-8	F	7,891	3,238	---	---
57	GTW-9	FA	2,740	2,140	52,76	11,348
58	GTW-10	FA	7,256	5,693	46,85	6,665
59	GTW-11	FA	7,092	4,205	48,02	7,112
60	GTW-12	FC	2,580	0,902	52,60	10,670
61	GTW-13	FCA	2,067	1,014	---	---

¹Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

²Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação do geossintético.

Geotêxtil não tecido de poliéster, filamentos contínuos (GTNcont)

Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Deformação inicial (%)	Índice de fluência	Ensaio de tração após fluência ¹	
					Resistência (kN/m)	Deformação (%)
62	GTNcont-1	F	21,153	1,027	---	---
63	GTNcont-2	F	24,490	0,954	---	---
64	GTNcont-3	F	33,153	1,318	---	---
65	GTNcont-4	F	36,933	1,290	---	---
66	GTNcont-5	F	37,720	1,454	---	---
67	GTNcont-6	FA	26,942	2,411	---	---
68	GTNcont-7	FA	32,619	3,324	---	---
69	GTNcont-8	FC	6,827	0,190	---	---
70	GTNcont-9	FCA	6,490	0,780	---	---
71	GTNcont-10	FCA	8,570	1,424	---	---

¹Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.

Geotêxtil não tecido de poliéster, fibras curtas (GTNcurto)

Ensaio conduzido no sentido transversal de fabricação

Nº	Designação	Tipo	Deformação inicial (%)	Índice de fluência	Ensaio de tração após fluência ¹	
					Resistência (kN/m)	Deformação (%)
72	GTNcurto-1	F	31,957	0,559	---	---
73	GTNcurto-2	FC	21,917	0,100	---	---
74	GTNcurto-3	FCA	16,917	0,225	---	---

¹Realização de ensaios de tração (ASTM D 6637) após a conclusão do referido ensaio de fluência.