Thelma Sumie Maggi Marisa Kamiji

FLUÊNCIA DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS CONFINADOS

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

Orientador: Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno

São Carlos

2006

Aos meus pais, Masayuki e Célia;

Ao Rafael Ribeiro Plácido;

À minha irmã, Thaysa Hanako;

Dedico esta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno pela orientação e amizade.

Ao Rafael Ribeiro Plácido pelo apoio e companheirismo durante a realização deste trabalho.

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

Aos amigos Fernando Lavoie e Ovídio pelo constante apoio e amizade.

Aos amigos do Departamento de Geotecnia.

Aos funcionários Clever, Silvio, José Luiz e Oscar pela constante ajuda nas atividades de laboratório.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Geotecnia pela atenção e ajuda dispensada.

Especialmente aos meus pais, Masayuki e Célia, por serem os grandes responsáveis por todas as minhas conquistas.

RESUMO

Kamiji, T. S. M. M. (2006). Fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

Este trabalho apresenta resultados de ensaios de fluência de geotêxteis não tecidos executados em ensaios confinados. No equipamento utilizado, o reforço é confinado entre camadas de solo, permitindo que ambos os materiais tenham liberdade para apresentar deformações ao longo do tempo. Nesses ensaios, uma tensão vertical é aplicada ao solo que por sua vez solicita o reforço. Os ensaios foram realizados com três geotêxteis não tecidos, sendo dois de polipropileno e um de poliéster, e quatro tipos de solo confinante: três materiais granulares e uma argila silto-arenosa. Além disso, também foram executados ensaios de fluência não confinada para permitir comparação com os ensaios confinados. Os resultados indicaram que houve grande contribuição do confinamento na redução das deformações por fluência dos materiais ensaiados. Também foi avaliada a influência de alguns fatores na fluência confinada dos geotêxteis não tecidos, tais como: tipo de solo, tipo de geotêxtil e gramatura do reforço. Tais resultados são interessantes para avaliar o potencial de fluência do composto solo-geotêxtil que, normalmente, é baseado somente em ensaios no elemento isolado de reforço.

Palavras-chave: geotêxtil; fluência; confinamento; interação solo-reforço.

ABSTRACT

Kamiji, T. S. M. M. (2006). Creep of non woven geotextiles on confined tests. Dissertation – School of Engineering at Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2006.

This work presents results of creep tests on no woven geotextiles tested in confined lab tests. In the used equipment, the reinforcement is confined between two soil layers, allowing both materials to have freedom to deform with time. In those tests, a vertical stress is applied to the soil that transfers load to the reinforcement. The tests were performed using three no woven geotextiles, two of polypropylene and one of polyester, and four types of confining soil: three granular materials and sandy silty clay. Besides, unconfined creep tests were carried out to allow comparison with the confined tests. The results indicated that there was great contribution of the confinement in the reduction of the creep deformations of the tested materials. Also the influence of some factors was evaluated in the confined creep of the no woven geotextiles, such as: soil type, type of geotextile and mass per unit area of the reinforcement. Such results allow the evaluation of the potential of creep of the system soil-geotextile.

Keywords: geotextile; creep; confinement; soil-reinforcement interaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Curva típica de fluência em geotêxteis (REDDY & BUTUL, 1999).....	6
Figura 2.2. Predominância de determinado estágio de fluência (MIKI et al., 1990)....	7
Figura 2.3. Curvas de fluência para fibras compostas por diferentes polímeros. (a) 60% da resistência (b) 20% da resistência (DEN HOEDT, 1986).	10
Figura 2.4. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – 60% da resistência à tração (COSTA & BUENO, 2000).	11
Figura 2.5. Curvas de fluência para o geotêxtil tecido de PP obtidas para dois níveis de carregamentos distintos e a 20°C (MATICHARD et al., 1990).	13
Figura 2.6. Curvas de fluência para dois geotêxteis não tecidos de fibras contínuas, NT3 (PET) e NT4 (PP), obtidas para três níveis de carregamentos distintos e a 20°C	13
Figura 2.7. Curvas de fluência para o geotêxtil tecido de PP para um nível de carregamento de 50% e para três temperaturas distintas (MATICHARD et al., 1990).	15
Figura 2.8. Recalques ao longo do tempo após a sobrecarga ser mantida constante	17
Figura 2.9. Resultados de ensaios de fluência em dois tipos de geotêxtil. (a) geotêxtil não tecido termoligado, com 67% de PP e 33% de PE (b) geotêxtil não tecido agulhado 100% PET (McGOWN et al., 1982).....	19
Figura 2.10. Curva de compatibilidade para determinação do equilíbrio em solos reforçados (a) resistência do solo mobilizada x deformação lateral (b) curva isócrona do reforço (c) curva de compatibilidade de deformação (McGOWN et al., 1998).	21

Figura 2.11. Curvas do tipo deformação <i>versus</i> tempo para diferentes carregamentos.	25
Figura 2.12. Curvas <i>Sherby-Dorn</i>	26
Figura 2.13. Curvas isócronas.	26
Figura 2.14. Curva de ruptura por fluência.	27
Figura 2.15. Curvas de ruptura por fluência, obtidas a partir de ensaios de fluência convencionais e acelerados (BUENO et al., 2005).	28
Figura 2.16. Esquema do equipamento básico para ensaios de fluência não confinados (McGOWN et al., 1986).	30
Figura 2.17. Esquema geral do equipamento desenvolvido para ensaios acelerados	34
Figura 2.18. Equipamento para ensaios acelerados (HSUAN & YEO, 2005).	35
Figura 2.19. Esquema de ensaio com a presença de confinamento (COSTA, 2004).	38
Figura 2.20. Sistema de confinamento (McGOWN et al., 1982).	39
Figura 2.21. Sistema utilizado para obter a deformação do geotêxtil (McGOWN et al., 1982).	40
Figura 2.22. Esquema geral de um equipamento no qual o solo solicita o geotêxtil	41
Figura 2.23. Equipamento proposto por Wu & Hong (1994).	42
Figura 2.24. Equipamento proposto por Wu & Helwany (1996).	42
Figura 2.25. Configuração geral da instrumentação (WU & HELWANY, 1996).	43
Figura 2.26. Equipamento proposto por Helwany & Shih (1998).	45
Figura 2.27. Deslocamento lateral dependente do tempo à meia altura de face para ensaio com areia (HELWANY & SHIH, 1998).	46

Figura 2.28. Força axial dependente do tempo medida na extremidade do geotêxtil para ensaio com areia (HELWANY & SHIH, 1998).	46
Figura 2.29. Deslocamento lateral dependente do tempo à meia altura da face para ensaio com argila (HELWANY & SHIH, 1998).	47
Figura 2.30. Força axial dependente do tempo medida na extremidade do geotêxtil para ensaio com argila (HELWANY & SHIH, 1998).	47
Figura 2.31. Equipamento desenvolvido por Costa (2004).	49
Figura 2.32. Esquema geral do equipamento desenvolvido por Costa (2004).	50
Figura 2.33. Comparação entre as deformações obtidas no ensaio com o elemento de solo reforçado e em ensaios de fluência (COSTA, 2004).	51
Figura 3.1. Vista geral do equipamento utilizado, desenvolvido por Costa (2004). ..	53
Figura 3.2. Representação esquemática do equipamento (COSTA, 2004).	54
Figura 3.3. Princípio do mecanismo de transmissão de carga (COSTA, 2004).	55
Figura 3.4. Esquema da caixa de ensaios (a) vista lateral (b) vista superior (COSTA, 2004).	56
Figura 3.5. Disposição das hastes na manta (sem escala; dimensões em cm).	57
Figura 3.6. Detalhe de fixação da haste (sem escala).	58
Figura 3.7. Sistema de movimentação relógio-haste (COSTA, 2004).	58
Figura 3.8. Detalhes do sistema de leitura (a) movimentação relógio-haste (b) detalhe do parafuso com rosca de precisão (COSTA, 2004).	59
Figura 3.9. Esquema do posicionamento da célula de carga nos ensaios apenas com solo.	60
Figura 3.10. Detalhes do dispositivo utilizado para aplicação da tensão vertical (COSTA, 2004).	61
Figura 3.11. Vista geral da “chuva de areia” (COSTA, 2004).	61

Figura 3.12. Esquema do difusor (a) vista superior (b) corte AB (dimensões em mm)	62
Figura 3.13. Resultados dos ensaios de fluência sem confinamento para o geotêxtil 1.	65
Figura 3.14. Resultados dos ensaios de fluência sem confinamento para o geotêxtil 2.	65
Figura 3.15. Resultados dos ensaios de fluência sem confinamento para o geotêxtil 3.	66
Figura 3.16. Curvas granulométricas dos solos utilizados.	67
Figura 4.1. Resultados dos ensaios apenas com o solo 1.	76
Figura 4.2. Resultados dos ensaios apenas com o solo 2.	76
Figura 4.3. Propagação da tensão vertical aplicada (COSTA, 2004).	78
Figura 4.4. Variação do ângulo de atrito no estado plano de deformação do solo 1 com a tensão vertical aplicada.	79
Figura 4.5. Envoltórias de resistência do solo 2 para diferentes deformações.	82
Figura 4.6. Resultados dos ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 1.	84
Figura 4.7. Resultados dos ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 2.	84
Figura 4.8. Resultados dos ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solos 3 e 4 sob tensão vertical de 85 kPa.	85
Figura 4.9. Ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 1.	86
Figura 4.10. Ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 2.	86
Figura 4.11. Resultados de ensaios confinados pelos solos 1, 2 e 3 sob tensão vertical de	87
Figura 4.12. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 1.	88

Figura 4.13. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 2.	88
Figura 4.14. Variação da carga com o tempo para o ensaio de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 3.	89
Figura 4.15. Resultados dos ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 2 e sob tensão vertical de 100 kPa.	91
Figura 4.16. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 2 e sob tensão vertical de 100 kPa.	92
Figura 4.17. Resultados dos ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 3 e sob tensão vertical de 100 kPa.	93
Figura 4.18. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 3 e sob tensão vertical de 100 kPa.	94
Figura 4.19. Comparação entre grau de compactação do solo 2 – Solo reforçado com o geotêxtil 1.	96
Figura 4.20. Comparação entre teor de umidade do solo 2 – Solo reforçado com o geotêxtil 1.	98
Figura 4.21. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 1 e Solo 1.	100
Figura 4.22. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 1 e Solo 2.	100
Figura 4.23. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 1 e Solo 3.	101
Figura 4.24. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 2 e Solo 1.	103

Figura 4.25. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 2 e Solo 3.	104
Figura 4.26. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 2 e Solo 4.	104
Figura 4.27. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 3 e Solo 1.	106
Figura 4.28. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 3 e Solo 3.	107
Figura 4.29. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 3 e Solo 4.	107
Figura 4.30. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 1.	110
Figura 4.31. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 2.	112
Figura 4.32. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 3.	114
Figura 4.33. Comparação entre ensaios de fluência sem confinamento – Geotêxteis 2 e 3	115
Figura 4.34. Comparação entre ensaios de fluência sem confinamento – Geotêxteis 2 e 3	116
Figura 4.35. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – solo 1 e tensão vertical de 100 kPa (10% da resistência à tração).	118
Figura 4.36. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – solo 3 e tensão vertical de 100 kPa (5% da resistência à tração).	118

Figura 4.37. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – solo 4 e tensão vertical de 100 kPa (10% da resistência à tração).	119
Figura 4.38. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 2 (PET) e 3 (PP).	121
Figura 4.39. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxteis 1 e 3 (PP).....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Deformações no geotêxtil (WU & HELWANY, 1996).	44
Tabela 3.1. Características da compactação dos solos finos.	63
Tabela 3.2. Características dos geotêxteis utilizados.	64
Tabela 3.3. Ângulo de atrito de pico obtido nos ensaios triaxiais para o Solo 1 (COSTA, 2004).	68
Tabela 3.4. Características do Solo 2.	68
Tabela 3.5. Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais para o Solo 2 (PATIAS, 2005).	69
Tabela 3.6. Ensaios realizados.	74
Tabela 4.1. Coeficientes de empuxo ativo e em repouso do solo 1.	78
Tabela 4.2. Parâmetros de resistência do solo 2 para diferentes deformações.	82
Tabela 4.3. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	97
Tabela 4.4. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	99
Tabela 4.5. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	102
Tabela 4.6. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	105
Tabela 4.7. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	108
Tabela 4.8. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	117
Tabela 4.9. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).	120

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Introdução	4
2.2. Fluência de geotêxteis	5
2.2.1. Fatores Intervenientes da fluência de geotêxteis.....	8
2.3 Ensaio para avaliação da fluência de geotêxteis	23
2.3.1 Ensaio de fluência não confinados.....	29
2.3.2 Ensaio de fluência acelerados não confinados	31
2.3.3 Ensaio de fluência confinados.....	35
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1. Descrição do equipamento	52
3.1.1. Caixa de ensaios e sistema de garras	55
3.1.2. Sistema para obtenção da deformação no geotêxtil	57
3.1.3. Obtenção da força atuante nas paredes	59
3.1.4. Sistema para aplicação da tensão vertical.....	60
3.1.5. Acessórios utilizados para a preparação do material granular	61
3.1.6. Acessórios utilizados para a preparação dos solos finos.....	63
3.2. Geotêxteis e solos utilizados.....	64
3.2.1. Geotêxteis utilizados.....	64
3.2.2. Solos utilizados	66
3.3. Descrição dos ensaios realizados.....	71
3.3.1. Ensaio apenas com o solo	71

3.3.2.	Ensaios de fluência confinada	72
3.4.	Ensaios realizados	73
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		75
4.1.	Ensaios apenas com solo	75
4.2.	Ensaios de fluência confinada	83
4.2.1.	Geotêxtil 1 (PP).....	83
4.2.2.	Geotêxtil 2 (PET)	90
4.2.3.	Geotêxtil 3 (PP).....	93
4.3.	Influência do grau de compactação e teor de umidade do solo 2	95
4.4.	Influência do confinamento	99
4.4.1.	Geotêxtil 1 (PP).....	99
4.4.2.	Geotêxtil 2 (PET)	103
4.4.3.	Geotêxtil 3 (PP).....	106
4.5.	Fatores intervenientes da fluência confinada.....	109
4.5.1.	Tipo de solo confinante.....	109
4.5.2.	Tipo de polímero	115
4.5.3.	Gramatura do reforço.....	122
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES		123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		125

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os geotêxteis podem ser definidos como produtos têxteis permeáveis utilizados na engenharia geotécnica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR 12553, 1991). Esses materiais são constituídos por fibras obtidas através da fusão de polímeros, podendo desempenhar diversos papéis como parte integrante de um projeto de engenharia.

As funções freqüentemente associadas a estes materiais são: drenagem, filtração e reforço. Alguns autores destacam ainda a utilização de geotêxteis como elemento de proteção, no caso, por exemplo, em que se coloca este material entre uma geomembrana e uma camada de solo com o objetivo de evitar perfurações na mesma. Quando impregnados por betume, os geotêxteis podem funcionar ainda como uma barreira impermeável a líquidos e/ou vapores (KOERNER, 1994). No entanto, na prática, é comum observar geotêxteis desempenhando diferentes funções simultaneamente.

Como reforço, a inclusão de mantas de geotêxtil em uma massa de solo, melhora o comportamento mecânico do maciço, aumentando sua resistência e

diminuindo a sua compressibilidade, acarretando, portanto, obras mais econômicas e com uma geometria mais ousada. Dentre os possíveis exemplos de obras de solo reforçado com geotêxteis, incluem-se aterros sobre solos moles, reforços de fundações e estruturas de contenção.

Considerando os diversos tipos de aplicação dos geotêxteis, apenas a sua utilização como reforço pode exigir que os mesmos permaneçam tracionados por um longo período de tempo. Assim, para esse tipo de aplicação, o fenômeno da fluência e os reflexos desse mecanismo assumem grande importância no dimensionamento de obras geotécnicas.

A fluência em geotêxteis é importante e deve ser considerada adequadamente em projetos, pois pode induzir deformações excessivas indesejáveis. Para o caso de solo reforçado, pode levar ao colapso do sistema pela ruptura das inclusões. Neste contexto, o comportamento à fluência dos geotêxteis tem sido comumente estabelecido por meio de ensaios sem quaisquer dispositivos de confinamento.

Tal abordagem tem-se revelado inconsistente com base em observações do desempenho de estruturas reais. Em grande parte, isto se deve ao fato de que os métodos de análise ignoram os efeitos da interação solo-geotêxtil, na avaliação dos parâmetros de resistência dos reforços. Assim, as condições operacionais de um maciço reforçado com geotêxteis não são efetivamente simuladas através de ensaios de fluência não confinados, cujos resultados tendem a comprometer a aferição do comportamento global da estrutura, principalmente em termos das deformações resultantes.

Considera-se que o confinamento, em geotêxteis não tecidos, reduz a estrição da manta restringindo o movimento individual das fibras, evitando que elas

se alinhem ao longo da direção de aplicação da carga. A estricção pode ser reduzida pelo atrito solo-geotêxtil na direção perpendicular à solicitação, pelo aumento do atrito entre as fibras e uma possível impregnação de solo na manta diminuindo a possibilidade de deslizamento entre as fibras (COSTA, 2004). Com relação aos geotêxteis tecidos pode-se dizer, em geral, que são pouco influenciados pelo confinamento (KOERNER, 1994).

Apesar da importância do confinamento na fluência de geotêxteis não tecidos, os coeficientes de segurança utilizados em projetos resultam de ensaios sem confinamento, tratando-se, portanto de valores conservativos.

Assim, pesquisas sobre fluência confinada em geotêxteis não tecidos tornam-se interessantes e podem contribuir para a adoção de critérios de projetos mais condizentes com a realidade.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos:

- ◆ Quantificar a fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados;
- ◆ Comparar resultados de ensaios de fluência confinada com ensaios não confinados;
- ◆ Investigar fatores intervenientes da fluência confinada de geotêxteis não tecidos, tais como: tipo de polímero, tipo de solo e gramatura do geotêxtil.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos relativos ao fenômeno da fluência em geotêxteis. Apresenta também os principais métodos para a caracterização da fluência dando ênfase aos ensaios com a presença de confinamento. Este ainda é pouco explorado, mas cuja consideração é importante para uma interpretação mais racional da resistência à tração do reforço com o tempo.

2.1. Introdução

Todos os materiais poliméricos apresentam um comportamento viscoelástico quando sujeitos a carregamentos de longa duração, isto é, apresentam fluência e/ou relaxação.

A fluência de geotêxteis constitui um aspecto importante a ser considerado em projetos de muros e taludes de solo reforçado, pois pode ocasionar deformações excessivas e uma eventual ruptura. A relaxação também pode ser relevante, por exemplo, caso a menor tendência à fluência do solo impeça a deformação do geotêxtil ao longo do tempo em muros de solo reforçado.

Apesar da importância, os projetos atuais não contemplam um procedimento analítico satisfatório para avaliar a fluência dos geossintéticos. Conseqüentemente, tornam-se, em geral, muito conservadores. Uma compreensão completa deste comportamento deve reprisar em um modelo constitutivo adequado, que considere os fenômenos de fluência e relaxação, e procedimentos laboratoriais simples que permitam quantificar os parâmetros envolvidos.

2.2. Fluência de geotêxteis

Entende-se por fluência o fenômeno físico no qual um material se deforma sob ação de um carregamento constante (KOERNER, 1998). O fenômeno é dependente do tempo e se deve à natureza elastoviscoplastica do material (MSOUTI et al., 1997). A fluência também pode ser interpretada como uma redução na rigidez do material ao longo do tempo, que pode ser quantificada se as relações carga x deformação ao longo do tempo forem estabelecidas.

Até três fases distintas podem ser evidenciadas na fluência de geotêxteis, quais sejam: primária, secundária e terciária (CAZZUFFI et al., 1997; MIKI et al.,

1990). A Figura 2.1 identifica as fases mencionadas em termos de deformação e da velocidade ou taxa de deformação que cada uma apresenta.

Figura 2.1. Curva típica de fluência em geotêxteis (REDDY & BUTUL, 1999).

- ♦ Fluência primária: nessa fase as deformações ocorrem rapidamente, ao passo que a velocidade de deformação diminui rapidamente (trecho 1 da Figura 2.1);
- ♦ Fluência secundária: nessa fase o material escoa e a taxa de deformação torna-se praticamente constante com o tempo (trecho 2 da Figura 2.1);
- ♦ Fluência terciária: essa fase caracteriza-se por apresentar uma velocidade crescente de deformação, culminando com a ruptura (trecho 3 da Figura 2.1).

Portanto, pode-se dizer que para qualquer tempo (t) a deformação total (ε) devida à fluência pode ser obtida através do somatório das deformações ocorridas em cada estágio acrescentando-se o efeito da fluência à deformação que ocorre instantaneamente, ou seja:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.1)$$

Onde:

ε_0 - deformação instantânea;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - deformação primária, secundária e terciária, respectivamente.

Também pode ocorrer dependendo do tipo de geotêxtil e do nível de carregamento, a predominância de determinado estágio, como pode ser visto na Figura 2.2.

Para geotêxteis fabricados a partir de polietileno (PE) ou polipropileno (PP), a fluência terciária é predominante, enquanto que para geotêxteis fabricados por poliéster (PET) a fluência primária é predominante. Portanto, alguns materiais podem não apresentar deformação e taxa de deformação crescentes antes da ruptura (REDDY & BUTUL, 1999).

Figura 2.2. Predominância de determinado estágio de fluência (MIKI et al., 1990).

Koerner et al. (1988) citam três procedimentos que têm sido bastante utilizados para a determinação da deformação por fluência:

- ♦ Ensaios de laboratório: utilizados para registrar diretamente o comportamento de fluência dos geossintéticos. Apresentam como dificuldade o longo tempo

necessário para a realização e a necessidade de confinamento para a simulação da situação real no caso de geotêxteis não tecidos. Atualmente, a maioria dos estudos disponíveis provém de ensaios não confinados;

- ◆ Projeção analítica: obtida através de modelos reológicos e empíricos. Ambos requerem dados de laboratório como parâmetros iniciais. Como no item anterior, idealmente as mantas não tecidas deveriam ser confinadas por solo;
- ◆ Acompanhamento do desempenho de obras de solo reforçado. Resultados obtidos de obras instrumentadas têm mostrado que a fluência medida é na maioria das vezes inferior à estimada.

2.2.1. Fatores Intervenientes da fluência de geotêxteis

São vários os fatores que interferem na fluência de geotêxteis, dentre eles:

- ◆ Tipo de polímero;
- ◆ Tipo de geotêxtil quanto à forma de fabricação;
- ◆ Nível de carregamento;
- ◆ Temperatura;
- ◆ Tempo de carregamento.

Além disso, em geotêxteis não tecidos é importante a consideração do efeito do confinamento (COSTA, 1999).

A seguir procede-se a uma explicação mais detalhada sobre a influência de cada um dos fatores separadamente.

2.2.1.1. Tipo de polímero

Os geotêxteis são constituídos essencialmente por polímeros e, em menor escala, por aditivos. Os aditivos têm função de introduzir melhorias no processo de fabricação ou modificar aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico. Os principais polímeros utilizados na fabricação dos geotêxteis são: poliamida (PA), polietileno (PE), poliéster (PET) e polipropileno (PP).

No que diz respeito ao tipo de polímero, a diferença na fluência pode ser evidenciada através do comportamento das fibras que compõem os geotêxteis. A Figura 2.3 ilustra esse fato, apresentando resultados de ensaios de fluência para fibras compostas por diferentes polímeros, para dois níveis de carregamento diferentes. Porém, deve ser lembrado que a fluência em fibras isoladas pode não reproduzir o comportamento da fluência em geotêxteis não tecidos confeccionados com essas mesmas fibras que apresentam a denominada fluência estrutural.

A Figura 2.3a mostra que para carregamento correspondente a 60% da resistência a tração, as fibras de PE apresentam um crescimento acentuado da deformação com o tempo, tendendo a um valor assintótico em pouco tempo de ensaio. Para os níveis de carga aplicados, as fibras de PET apresentam uma relação quase linear entre deformação e logaritmo do tempo. As de PP e de PA apresentam uma ligeira curvatura, com concavidade para cima, em instantes próximos à ruptura.

Quando o carregamento é menor, correspondente a 20% da resistência a tração, os efeitos são minimizados, porém o efeito do tipo de polímero ainda é evidenciado (Figura 2.3b).

Além disso, Den Hoedt (1986) destaca uma diferença fundamental de comportamento quanto à deformação. Para as fibras de PE e de PP, o alongamento, sob carregamento constante, é muito maior do que sob carregamento rápido. Ao contrário, as de PA e de PET não mostram tal comportamento.

Quanto mais cristalino é o polímero, ou seja, quanto maior a orientação entre as moléculas, maior é a sua resistência mecânica, porém, mais susceptível à fluência (DEN HOEDT, 1986; KOERNER, 1998).

Figura 2.3. Curvas de fluência para fibras compostas por diferentes polímeros. (a) 60% da resistência (b) 20% da resistência (DEN HOEDT, 1986).

Costa & Bueno (2000) realizaram ensaios de fluência não confinados utilizando dois geotêxteis não tecidos: um de polipropileno e um de poliéster. A Figura 2.4 ilustra o comportamento obtido para os dois tipos de geotêxteis, comprovando a influência marcante do polímero nas deformações a longo prazo desses materiais. Os resultados indicaram que a fluência do geotêxtil de poliéster foi bem menor em relação ao geotêxtil de polipropileno, cerca de 10 vezes inferior para um carregamento correspondente a 60% da resistência à tração.

Figura 2.4. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – 60% da resistência à tração (COSTA & BUENO, 2000).

2.2.1.2. Tipo de geotêxtil

Com relação à estrutura das mantas, alguns autores consideram a existência de uma fluência estrutural relacionada à movimentação e realinhamento das fibras ao longo do tempo (RIMOLDI & MONTANELLI, 1993). Nesse sentido, os resultados encontrados por Shrestha & Bell (1982) demonstram uma maior tendência à fluência para geotêxteis não tecidos em comparação aos tecidos. No caso dos não tecidos, foi detectada uma fluência mais acentuada para geotêxteis com filamentos contínuos em oposição aos confeccionados com fibras cortadas.

Destaque também deve ser dado à presença ou não de confinamento, pois os geotêxteis são materiais compressíveis e ganham rigidez quando comprimidos, reduzindo assim a magnitude da fluência. As mantas não tecidas apresentam maiores deformações totais medidas em ensaios de fluência sem confinamento, contudo, as mantas tecidas não apresentam variação significativa da resposta à fluência quando em confinamento (LEVACHER et al., 1994 e MSOUTI et al., 1997).

2.2.1.3. Nível de carregamento

Resultados de ensaios realizados por Matichard et al. (1990) demonstram a diferença de comportamento à fluência devido ao nível de carregamento. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam as curvas obtidas nos ensaios de fluência realizados com geotêxteis tecidos e não tecidos, respectivamente, sob diferentes níveis de carregamento.

É possível perceber a partir da análise das Figuras 2.5 e 2.6 que a fluência do geotêxtil de poliéster termoligado de fibras contínuas (NT3) é pouco influenciada pelo nível de carregamento. Esse comportamento não é observado para os geotêxteis de polipropileno (NT4 e T2) para os quais se verifica uma forte influência no nível de carregamento. Portanto, pode-se dizer que o carregamento tem forte influência sobre a fluência de geotêxteis, que, por sua vez, também depende do tipo de polímero constituinte da manta.

Figura 2.5. Curvas de fluência para o geotêxtil tecido de PP obtidas para dois níveis de carregamentos distintos e a 20°C (MATICHARD et al., 1990).

Figura 2.6. Curvas de fluência para dois geotêxteis não tecidos de fibras contínuas, NT3 (PET) e NT4 (PP), obtidas para três níveis de carregamentos distintos e a 20°C (MATICHARD et al., 1990).

2.2.1.4. Temperatura

Dependendo do tipo de polímero e do nível de carregamento um ensaio de fluência pode levar muito tempo. Para reduzir esse problema, muitos pesquisadores vêm utilizando a temperatura para acelerar os fenômenos viscosos e viscoelásticos dos polímeros (THORNTON et al., 1997). Mudanças na temperatura modificam a taxa de fluência e, em geral, um aumento na temperatura acelera a fluência em geotêxteis (MATICHARD et al., 1990). Portanto, pode-se dizer que a temperatura altera a velocidade com que a fluência dos geotêxteis se desenvolve. Além disso, elevadas temperaturas associadas a métodos de superposição de tempo-temperatura (STT) têm sido utilizados para reduzir a duração dos ensaios (ALLEN, 1991).

Para ilustrar o efeito da temperatura na fluência de geotêxteis apresentam-se na Figura 2.7 resultados de ensaios de fluência realizados por Matichard et al. (1990) em geotêxteis tecidos de polipropileno para um nível de carregamento correspondente a 50% da resistência à tração e para três temperaturas distintas.

Figura 2.7. Curvas de fluência para o geotêxtil tecido de PP para um nível de carregamento de 50% e para três temperaturas distintas (MATICHARD et al., 1990).

Observando-se a Figura 2.7, percebe-se que, para temperaturas elevadas, a deformação por fluência atinge valores maiores em um menor período de tempo.

Outro fator importante na susceptibilidade à fluência está relacionado às temperaturas de transição em polímeros que assumem grande importância para o estudo de suas propriedades viscoelásticas (fluência e relaxação).

2.2.1.5. Velocidade de carregamento

A influência do tempo de carregamento no comportamento mecânico dos polímeros foi estudada por Rimoldi & Montanelli (1993) através da execução de ensaios de fluência em geossintéticos em que se aplicava uma carga correspondente a 40% da resistência à tração, considerando velocidades distintas

de aplicação da carga. As velocidades de carregamento utilizadas foram as seguintes:

- ◆ 1º ensaio: carregamento aplicado em menos de 1 minuto;
- ◆ 2º ensaio: carregamento aplicado em um tempo igual a 3 minutos;
- ◆ 3º ensaio: carregamento aplicado em um tempo igual a 1 hora.

Os resultados encontrados permitiram verificar que:

- ◆ A maior deformação inicial foi observada nos ensaios com maior tempo de aplicação da carga;
- ◆ A taxa de variação da fluência observada no início dos ensaios com maior tempo de aplicação de carga foi inferior à taxa de fluência observada nos ensaios com um menor tempo de aplicação de carga.

Além disso, apenas para um tempo de carregamento superior a 1 h, a taxa de fluência nos três ensaios realizados tornou-se semelhante.

Estudos realizados por Gottardi & Simonini (2000) baseados em modelos de muros de solo reforçado também demonstram o efeito da velocidade de carregamento na fluência. O material de aterro era constituído por areia pura e o reforço de polipropileno (PP). Os ensaios foram executados utilizando-se a mesma sobrecarga, porém com quatro diferentes tempos de carregamento. A Figura 2.8 ilustra os resultados de recalques observados no topo das estruturas ao longo do tempo.

Figura 2.8. Recalques ao longo do tempo após a sobrecarga ser mantida constante (GOTTARDI & SIMONINI, 2000).

Analisando-se a Figura 2.8 percebe-se que a taxa de recalque, observada no início do ensaio com tempo de aplicação de carga maior, foi inferior à taxa de recalque observada nos ensaios com um menor tempo de aplicação de carga.

2.2.1.6. Presença de solo e tensão confinante

Vários são os exemplos de estruturas de solo reforçado que apresentaram deformações por fluência bastante inferiores às inicialmente previstas com base em ensaios não confinados (McGOWN et al., 1982; BARET, 1985; DELMAS, 1988;

COSTA, 2004). Estes resultados sugerem que os projetos baseados em ensaios não confinados são bastante conservadores.

Tais discrepâncias podem ser explicadas, parcialmente, pela complexidade estrutural dos geotêxteis. Para os geotêxteis não tecidos agulhados, além da fluência dos filamentos do geotêxtil, também é relevante a interação entre os filamentos e o solo. Os geotêxteis não tecidos agulhados, especialmente, são compostos por filamentos dispostos de forma aleatória e sinuosa, não alinhados com o carregamento. A deformação total é composta por uma parcela devida à deformação dos filamentos e outra devida ao seu rearranjo espacial, denominada deformação estrutural (DEN HOEDT, 1986).

Quanto mais complexa a estrutura do geotêxtil, menor será a importância das deformações dos filamentos isolados e maior a das deformações estruturais, correspondentes aos deslizamentos interfilamentos e reorientação dos filamentos. Como as deformações estruturais também são dependentes do tempo, nos geotêxteis não tecidos, elas representam uma importante parcela nas deformações por fluência.

McGown et al. (1982) apresentam resultados pioneiros de ensaios de fluência de geotêxteis não tecidos confinados por solo. Nestes ensaios, cujos resultados são apresentados na Figura 2.9, percebe-se que a interação solo-reforço reduz significativamente as deformações de fluência. Dois geotêxteis foram avaliados, o primeiro (Figura 2.9a), não tecido, termoligado de filamentos contínuos, composto por 67% de PP e 33% de PE; e o segundo (Figura 2.9b), não tecido, agulhado de filamentos contínuos, composto por 100% de PET.

Percebe-se que há uma notável redução das deformações totais em ambos os geotêxteis devida ao confinamento. Os autores concluem, portanto, que os

ensaios não confinados superestimam, de maneira grosseira, as deformações operacionais de longo prazo.

Figura 2.9. Resultados de ensaios de fluência em dois tipos de geotêxtil. (a) geotêxtil não tecido termoligado, com 67% de PP e 33% de PE (b) geotêxtil não tecido agulhado 100% PET (McGOWN et al., 1982).

A principal contribuição do confinamento, em geotêxteis não tecidos, é a redução da estricção da amostra, restringindo o movimento individual das fibras, evitando que elas se alinhem ao longo da direção de aplicação da carga. A estricção pode ser reduzida pelo atrito solo-geotêxtil na direção perpendicular à solicitação; pelo aumento do atrito entre as fibras e por uma possível impregnação de solo na manta diminuindo a possibilidade de deslizamento entre as fibras (COSTA, 2004).

A maior contribuição do confinamento em ensaios de fluência ocorre para os geotêxteis não tecidos agulhados, seguido pelos demais tipos. Com relação aos geotêxteis tecidos pode-se dizer, em geral, que são pouco influenciados pelo confinamento (KOERNER, 1998).

Alguns autores (McGOWN et al., 1998, KOERNER, 1998) consideram que, em estruturas de solo reforçado, a resistência do solo mobilizada em curto prazo afeta as deformações ao longo do tempo dos geossintéticos. Outro aspecto relacionado ao solo de aterro, que pode ser capaz de modificar as deformações do geossintético, diz respeito às características de fluência do solo (HELWANY, 1993). Tais aspectos serão discutidos a seguir.

2.2.1.6.1 Resistência do solo mobilizada em curto prazo

Baseado na hipótese de compatibilidade de deformação solo-reforço, McGown et al. (1998) consideram que a resistência do solo mobilizada em curto prazo interfere nas deformações dependentes do tempo do reforço. Para análise de deformações em muros de solo reforçado em condições de trabalho a hipótese de compatibilidade de deformação solo-reforço é frequentemente assumida e estabelece que a deformação do solo na direção do reforço é igual à deformação do reforço. Sendo assim, não ocorre deslizamento relativo na interface solo-reforço.

O estado de equilíbrio em um muro de solo reforçado pode ser compreendido com a utilização do conceito de compatibilidade de deformação. Esse equilíbrio será estabelecido com a igualdade das forças disponíveis no reforço em relação às forças requeridas no mesmo. O conceito de compatibilidade de deformação no caso de um muro escorado durante a construção pode ser ilustrado pela Figura 2.10. Inicialmente, solo e reforço não apresentam deformação e a força requerida para o equilíbrio corresponde ao empuxo do solo na condição de repouso (ponto A da

Figura 2.10c). Com a retirada do escoramento, passam a ocorrer deformações e a força requerida para o equilíbrio diminui progressivamente até um valor mínimo correspondente à mobilização da resistência de pico do solo $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{pico}}$. A partir desse valor, a força requerida aumenta até a mobilização da resistência do estado crítico $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{cr}}$. Já a força disponível no reforço aumenta continuamente com o desenvolvimento de deformações como ilustrado na Figura 2.10b e o equilíbrio ocorre com a interseção das duas curvas ilustradas na Figura 2.10c (ponto B).

Figura 2.10. Curva de compatibilidade para determinação do equilíbrio em solos reforçados (a) resistência do solo mobilizada x deformação lateral (b) curva isócrona do reforço (c) curva de compatibilidade de deformação (McGOWN et al., 1998).

Considerando o conceito de compatibilidade de deformação, caso o equilíbrio em curto prazo entre a força requerida e a disponível no reforço seja estabelecido antes da mobilização da resistência de pico do solo. Quando o sistema começar a deformar pela tendência à fluência do reforço, o acréscimo de deformação permitirá a mobilização de uma maior resistência do solo até que o pico seja atingido. A maior mobilização de resistência do solo provocará uma redução da força requerida no reforço (McGOWN et al., 1998). Assim, essa redução irá resultar em menores

deformações ao longo do tempo já que uma menor carga no reforço implica menor fluência.

Outra possível situação corresponde ao estabelecimento do equilíbrio inicial com a mobilização de uma resistência entre o valor de pico e o correspondente ao estado crítico. Nesse caso, haveria um aumento da carga no reforço ao longo do tempo. Ainda, considerando uma situação hipotética correspondente à mobilização de uma resistência em curto prazo equivalente ao estado crítico poder-se-ia esperar deformações ao longo do tempo sob carga constante.

2.2.1.6.2 Fluência do solo confinante

Wu & Helwany (1996) investigaram a interferência da fluência do solo na fluência de geotêxteis. O elemento de solo reforçado, composto por um reforço entre duas camadas de solo, era solicitado mediante a aplicação de uma carga vertical constante na superfície da massa de solo. As deformações do geotêxtil, ao longo do tempo, foram acompanhadas por meio de *strain gages* enquanto a força atuante no reforço após a aplicação da carga foi estimada através da deformação inicial dos *strain gages*.

Nessa investigação, foram realizados dois ensaios utilizando-se um geotêxtil de polipropileno (PP) não tecido termoligado. No primeiro, utilizou-se uma areia, em seguida, uma argila (caolinita) com grande tendência a apresentar fluência.

Os resultados obtidos mostraram que as deformações iniciais do geotêxtil em ambos os casos foram semelhantes às obtidas em ensaio com o geotêxtil isolado.

Entretanto, as deformações ao longo do tempo foram bem diferentes das obtidas com o material isolado. No caso da areia confinando o geotêxtil, o solo tende a se deformar mais lentamente que o geotêxtil. Já para a argila, o solo tem a tendência de se deformar mais rapidamente que o geotêxtil.

Diante dos resultados, a deformação do geotêxtil com o tempo foi significativamente afetada pela presença do solo. Se o solo confinante tem a tendência de se deformar mais rapidamente que o reforço, o geotêxtil irá restringir a deformação do solo em virtude do atrito e adesão existente entre ambos. Caso o geotêxtil tenha a tendência de se deformar mais rapidamente que o solo, ocorre a situação inversa (WU & HELWANY, 1996).

2.3 Ensaios para avaliação da fluência de geotêxteis

De uma maneira geral, os ensaios realizados para caracterizar a fluência em geotêxteis podem ser divididos em:

- ◆ Ensaios não confinados;
- ◆ Ensaios confinados.

A presença ou não de confinamento leva em conta o fato de o corpo de prova estar ou não submetido ao efeito de tensões confinantes durante a realização dos ensaios. Apesar de os ensaios confinados se aproximarem mais da condição real das obras, principalmente quando se trata de geotêxteis não tecidos, trabalhos

recentes têm demonstrado que ainda existem dificuldades relativas ao desenvolvimento de equipamentos e à interpretação dos dados.

Assim, a grande maioria dos dados existentes sobre fluência dos geotêxteis, provém de ensaios de laboratório nos quais o material é estudado isoladamente. Nestes ensaios, corpos de prova, geralmente com 200 mm de largura e 200 mm de comprimento, são submetidos a carregamentos constantes correspondentes a uma parcela da resistência à tração (normalmente entre 10 e 60%), registrando-se as deformações em tempos preestabelecidos (ensaios não confinados convencionais). Estes resultados disponíveis são baseados em normas internacionais (ex., ASTM D 5262, ISO 13431). A norma brasileira referente aos ensaios não confinados de fluência em geotêxteis foi publicada recentemente (NBR 15226/2005).

O principal problema associado aos ensaios de fluência não confinada é o tempo requerido para que se obtenha uma resposta significativa (MATICHARD et al., 1990). Diante disto, as normas disponíveis requerem um tempo mínimo de ensaios. A ISO 13431, por exemplo, requer 1.000 horas, ou seja, cerca de 42 dias, já a ASTM D-5262 indica um tempo de 10.000 horas o que representa cerca de 1 ano e 3 meses de ensaio.

Um recurso utilizado para suplantar esse problema em ensaios de fluência consiste na utilização de temperaturas elevadas, já que estas aceleram o processo de fluência, associadas às técnicas de superposição tempo-temperatura (STT) (ALLEN, 1991). Um método que, atualmente, vem obtendo bastante destaque é o proposto por Thornton et al. (1998), denominado *Stepped Isothermal Method* (SIM).

A resposta obtida pelos ensaios de fluência sem confinamento, acelerados ou não, pode ser representada comumente por curvas deformação *versus* tempo, este geralmente em escala logarítmica (Figura 2.11).

Figura 2.11. Curvas do tipo deformação *versus* tempo para diferentes carregamentos.

A partir das curvas de fluência, para cada nível de carregamento, é possível obter outras curvas de interesse para projetos de estruturas de solo reforçado com geotêxtil, tais como:

- ◆ Curvas *Sherby-Dorn* obtidas ao se plotar o logaritmo da taxa de deformação *versus* deformação (Figura 2.12). Estas curvas permitem que se tenha uma clara visualização da aproximação da instabilidade do material (COSTA, 1999);
- ◆ Curvas isócronas, que relacionam as deformações com os carregamentos para tempos iguais (Figura 2.13). Cada isócrona representa a relação das deformações em função da variação da carga aplicada para um mesmo tempo. Além disso, a relação entre um determinado valor de carga (T) e a correspondente deformação (ϵ) obtida através das curvas isócronas representa a rigidez por fluência ($J_{\text{fluência}}$) (Figura 2.13). Para a obtenção de uma isócrona são necessários vários ensaios de fluência sob cargas variadas, o que, pelo modo convencional, demanda muito tempo e, conseqüentemente, torna-se um processo oneroso.

Figura 2.12. Curvas *Sherby-Dorn*.

Figura 2.13. Curvas isócronas.

Para definir a curva de ruptura por fluência carregam-se corpos de prova com níveis de carga elevados (entre 60 e 90% da carga que provoca a ruptura do material sob tracionamento em faixa larga) e registram-se os tempos para a ruptura dos corpos de prova. As normas recomendam a utilização de três corpos de prova para cada nível de carregamento.

Construindo-se um gráfico com o tempo de ruptura (em escala logarítmica) *versus* carregamento aplicado, os pontos se alinham e a reta resultante pode ser extrapolada em um ciclo logarítmico sem perda de precisão (JEWELL &

GREENWOOD, 1988). Dessa forma, ao se estabelecer um tempo de vida útil para a obra, é possível obter o nível de carga máxima que pode ser aplicado ao material, conforme apresentado na Figura 2.14.

Figura 2.14. Curva de ruptura por fluência.

Bueno et al. (2005) realizaram ensaios de fluência convencionais e acelerados para definir a curva de ruptura por fluência para dois geotêxteis não tecidos: um de polipropileno (geotêxtil A) e um de poliéster (geotêxtil B). Figura 2.15 apresenta as curvas de ruptura por fluência, obtida para os dois geotêxteis.

Nota-se uma boa consistência entre os resultados de ruptura por fluência obtidos através de ensaios convencionais e acelerados. A curva de ruptura por fluência obtida para o geotêxtil de polipropileno apresenta-se mais íngreme do que a obtida para o geotêxtil de poliéster, o que conduz a um maior fator de redução devido à fluência. Para um carregamento equivalente a 65% $T_{ult.}$, o tempo de ruptura por fluência excedeu 12 anos para o geotêxtil A (PP), enquanto que para o geotêxtil B (PET) o tempo de ruptura excedeu 120 anos.

Figura 2.15. Curvas de ruptura por fluência, obtidas a partir de ensaios de fluência convencionais e acelerados (BUENO et al., 2005).

Os resultados obtidos pelos autores indicam que a combinação de ensaios convencionais e acelerados permite a determinação da curva de ruptura por fluência, para geotêxteis não tecidos de polipropileno e de poliéster, em curtos períodos de tempo.

Para a realização dos ensaios confinados ainda não há nenhuma norma específica. No entanto, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo equipamentos e procedimentos de ensaios para tal finalidade. De uma forma geral, considera-se a existência de duas abordagens distintas em ensaios com confinamento: ensaios nos quais a carga é aplicada diretamente ao geotêxtil e ensaios nos quais o solo solicita o geotêxtil.

No primeiro caso, pretende-se estudar o comportamento do reforço quando confinado no solo, considerando o efeito da tensão confinante, bem como uma eventual impregnação de partículas no geotêxtil. Nessa abordagem, a manta é

confinada entre camadas de solo e uma força de tração é aplicada diretamente ao geotêxtil, por meio, por exemplo, de pesos mortos.

No outro caso, pretende-se confinar o geotêxtil entre camadas de solo que podem deformar, permitindo a interferência do comportamento tensão-deformação do solo no processo. Nesse tipo de ensaio, aplica-se um carregamento ao solo e este, por sua vez, solicita o geotêxtil. Assim, pode-se avaliar, por exemplo, como a tendência à fluência do solo interfere na fluência do reforço.

2.3.1 Ensaios de fluência não confinados

Para a realização dos ensaios de fluência não confinados existem algumas normas disponíveis, dentre as quais podemos destacar a norma ISO 13431, a ASTM D 5262, a BS 6906 e a NBR 15226.

Os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios de fluência não confinados são considerados relativamente simples. Costa (1999) descreve que, apesar de algumas variações do modelo básico, os equipamentos apresentam três partes principais:

- ♦ Sistema de ancoragem;
- ♦ Sistema para acompanhamento das deformações;
- ♦ Sistema de aplicação de carga.

O esquema do equipamento básico está ilustrado na Figura 2.16. Observa-se que ele é composto por um cavalete dotado de uma garra superior para fixação do corpo de prova de geotêxtil e uma garra inferior para fixação do corpo de prova e aplicação do carregamento.

Para que não haja influência de fatores que possam afetar a qualidade dos resultados, algumas recomendações devem ser respeitadas:

- ♦ Deve-se evitar o escorregamento relativo entre as garras e o corpo de prova;
- ♦ As garras devem ser projetadas de tal modo que não danifiquem o material a ser ensaiado;
- ♦ Quanto ao equipamento, o suporte deve ser constituído de material rígido, para evitar deformações, e também estar isolado de vibrações;
- ♦ O carregamento deve ser aplicado rápido e suavemente, mantendo-se constante durante todo o ensaio.

Resultados de ensaios não confinados podem ser encontrados com maiores detalhes em Costa (1999).

Figura 2.16. Esquema do equipamento básico para ensaios de fluência não confinados (McGOWN et al., 1986).

2.3.2 Ensaios de fluência acelerados não confinados

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

Para suplantar o inconveniente do tempo dos ensaios, as deformações por fluência podem ser estimadas através de modelos analíticos ou com a utilização de ensaios acelerados (STT) (ALLEN, 1991).

2.3.2.6 Stepped Isothermal Method (SIM)

Um método que, atualmente, vem obtendo bastante destaque é o proposto por Thornton et al. (1998), denominado *Stepped Isothermal Method* (SIM).

O método SIM utiliza conceitos de superposição tempo-temperatura para caracterizar propriedades viscoelásticas de materiais poliméricos. Enquanto apenas o comportamento a fluência tem sido caracterizado, o SIM também é aplicável para outros mecanismos (p.ex. relaxação). O SIM envolve carregamento de uma única amostra, que fica exposta a incrementos de temperatura controlada. A utilização de uma única amostra elimina a variabilidade do material, que tem sido observada

quando da utilização de técnicas convencionais de superposição tempo-temperatura (STT) envolvendo diferentes corpos de prova ensaiados sob diferentes temperaturas.

A premissa fundamental do SIM é que os processos viscoelásticos são acelerados através da elevação da temperatura de uma maneira previsível. A equação de Arrhenius é fundamental para analisar a relação entre a taxa de reação com a temperatura. Por outro lado, a equação de Williams-Landel-Ferry (WLF) e o princípio da superposição de Boltzmann são importantes para justificar a obtenção da curva de fluência pelo método SIM.

Uma norma que orienta a realização dos ensaios acelerados de fluência não confinados, utilizando-se o método SIM, foi aprovada recentemente pela ASTM *International* (ASTM D 6992 – 03).

2.3.2.6.1 Equipamentos

A grande diferença entre os ensaios acelerados e os convencionais, em termos de equipamento, é a necessidade de se ter um ambiente com temperatura controlada. O equipamento a ser utilizado nos ensaios deve, portanto, conter:

- ◆ Sistema de fixação (ancoragem) do material;
- ◆ Sistema para aplicação e controle do carregamento;
- ◆ Sistema para acompanhamento das deformações;
- ◆ Sistema para acompanhamento do tempo;
- ◆ Ambiente com temperatura controlada;

- ◆ Sistema de aquisição de dados computacional.

Diferentemente dos ensaios convencionais de fluência não confinados, a dimensão da amostra nos ensaios acelerados utilizando o método SIM pode variar de acordo com o material e com o sistema de fixação a serem utilizados.

Um exemplo deste tipo de equipamento foi construído e testado por Baras (2001), onde foi desenvolvida uma câmara para este fim.

A Figura 2.17 apresenta um esquema geral do equipamento desenvolvido.

A câmara é composta por cantoneiras de alumínio ligadas entre si por rebites. O controle de temperatura no interior da caixa é feito através de resistências elétricas, ventiladores internos e sensores de temperatura. Externamente, há um controle de temperatura e uma chave contatora. Além disso, quanto ao funcionamento, a câmara é capaz de permitir que os níveis de temperatura requeridos se estabilizem entre 10 e 50 segundos, tempo considerado satisfatório para o objetivo do ensaio.

Durante o desenvolvimento dos equipamentos necessários ao correto funcionamento da câmara, levou-se em consideração a utilização do método SIM para a realização dos ensaios, ou seja, altos gradientes de temperatura obtidos em tempos muito pequenos.

Resultados de ensaios acelerados de fluência não confinados utilizando o método SIM podem ser encontrados em Baras (2001) e Costanzi (2003).

Figura 2.17. Esquema geral do equipamento desenvolvido para ensaios acelerados (BARAS, 2001).

Outro exemplo de equipamento utilizado para realizar ensaios acelerados de fluência é apresentado por Hsuan & Yeo (2005) (Figura 2.18). A temperatura do ensaio é controlada através de uma câmara e, para ensaios com temperatura abaixo de 40°C, um dispositivo de resfriamento é utilizado para atingir e manter a temperatura desejada. A precisão da temperatura na câmara é $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Os ensaios são realizados de acordo com a ASTM D 6992.

Hsuan & Yeo (2005) apresentam resultados de ensaios realizados com esse equipamento utilizando-se geogrelhas de polietileno de alta densidade (PEAD).

Figura 2.18. Equipamento para ensaios acelerados (HSUAN & YEO, 2005).

2.3.3 Ensaios de fluência confinados

Materiais compressíveis, como os geotêxteis não tecidos agulhados, sofrem ação do confinamento no solo quando enterrados e apresentam rigidez superior à do material ensaiado sem confinamento. Para se avaliar mais fielmente o desempenho do geotêxtil, executam-se ensaios confinados.

A presença de um sistema de confinamento confere algumas dificuldades aos ensaios. A principal é o desenvolvimento de equipamento capaz de permitir o confinamento do geotêxtil entre camadas de solo e de garantir compatibilidade de deformação entre o solo e o geotêxtil (COSTA & BUENO, 2000). Além disso, o ensaio deveria inibir ao máximo o atrito nas bordas e o deslocamento relativo entre o solo e o geotêxtil, de tal forma que a carga aplicada pudesse ser transmitida ao

geotêxtil de maneira uniforme ao longo de seu comprimento. Um instrumental ideal ainda não existe embora alguns forneçam resultados bastante satisfatórios.

Entende-se que, quando o geotêxtil é confinado no solo, não apenas as partículas penetram a matriz têxtil da manta e promovem uma restrição ao movimento, como o confinamento aproxima suas fibras, aumentando a força de atrito entre elas e, portanto, dando maior rigidez ao produto. No entanto, tem-se constatado que a aproximação das fibras é o fator mais importante no processo, já que o imbricamento da matriz têxtil pelas partículas de solo é de menor importância na maioria dos casos, exceto quando se utilizam solos granulares limpos. Por esse motivo, tem-se sugerido executar esse tipo de ensaio sem a presença de solo, confinando-se o geotêxtil com membranas lisas, para facilitar a montagem dos equipamentos.

De uma forma geral, considera-se a existência de duas abordagens distintas em ensaios com confinamento: ensaios nos quais a carga é aplicada diretamente ao geotêxtil e ensaios nos quais o solo solicita o geotêxtil.

2.3.3.6 Ensaios nos quais a carga é aplicada diretamente ao geotêxtil

Nessa abordagem, a manta é confinada entre camadas de solo e uma força de tração é aplicada diretamente ao geotêxtil, por meio, por exemplo, de pesos mortos. Além da força de tração, uma tensão confinante é aplicada ao corpo de prova que se encontra geralmente inserido entre duas camadas de solo impedidas de se deformar durante o ensaio.

Na maioria dos equipamentos existentes ocorre movimento relativo entre o solo confinante e o geotêxtil, provocando mobilizações de forças de atrito na interface. Esse processo resulta em um comportamento carga-alongamento que reflete dois mecanismos distintos: ação do confinamento e ação de forças de atrito e/ou de adesão ao longo da interface.

A ação do confinamento abrange o efeito da tensão confinante na estrutura da manta e, eventualmente, a ação de partículas de solo impregnadas no geotêxtil.

Para ilustrar um possível efeito das forças de atrito e adesão ao longo da interface, a Figura 2.19 mostra um esquema de ensaio com a presença de confinamento. Percebe-se, neste caso, que o solo encontra-se contido pela caixa, ou seja, caso seja aplicada uma força (P) tracionando o geotêxtil, o movimento relativo solo-geotêxtil e solo-garra, ocasionado pela deformação do geotêxtil, provocará o aparecimento de tensões cisalhantes. Para uma seção transversal qualquer (ex. AB), a carga (P') atuando nessa seção será inferior à carga aplicada (P).

Este fato submete o corpo de prova a carregamentos diferentes ao longo de seu comprimento e inferiores àquela realmente aplicada, dificultando a análise dos resultados. A fluência observada nesse tipo de equipamento já será menor que a observada em um ensaio sem confinamento, submetido à mesma carga (P), ou seja, pode-se atribuir erroneamente ao confinamento, uma redução da fluência que, de fato, deve-se a uma redução de carregamento.

Figura 2.20. Sistema de confinamento (McGOWN et al., 1982).

A obtenção da deformação do geotêxtil é feita com base no deslocamento da extremidade do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 2.21.

As principais dificuldades encontradas para o desenvolvimento de equipamento deste tipo estão relacionadas à manutenção do contato solo-geotêxtil durante o processo de deformação, perfuração da bolsa por partículas de solo e transferência da carga aplicada em virtude das forças de atrito. Quanto às críticas associadas a esse equipamento citam-se as dificuldades de montagem de ensaio, principalmente com relação à preparação do solo. Além disso, nos ensaios realizados pelos autores, utilizaram-se apenas camadas de areia. No entanto, a

necessidade de compactação, no caso de outros materiais serem utilizados, provavelmente constituirá um empecilho para a correta utilização desse aparelho, exigindo, conseqüentemente, algum sistema de adaptação.

Figura 2.21. Sistema utilizado para obter a deformação do geotêxtil (McGOWN et al., 1982).

2.3.3.7 Ensaios nos quais o solo solicita o geotêxtil

Nesse tipo de ensaio, aplica-se um carregamento ao solo e este, por sua vez, solicita o geotêxtil. A Figura 2.22 apresenta um esquema geral deste tipo de equipamento. Vale destacar que esse processo de solicitação é bem mais condizente com as condições presentes em estruturas de solo reforçado, visto que o solo solicita o geotêxtil.

A seguir, serão apresentados alguns equipamentos relatados na literatura que utilizam esse processo de funcionamento, com o intuito de expor e discutir suas principais características.

Figura 2.22. Esquema geral de um equipamento no qual o solo solicita o geotêxtil (COSTA, 2004).

Wu & Hong (1994) propuseram um equipamento para ensaios de fluência confinada, baseado nos utilizados em ensaios de cisalhamento direto. Um esquema geral pode ser visto na Figura 2.23. A aplicação da força de tração constante na amostra de geotêxtil imersa entre duas camadas de solo é feita através de um compressor, sendo que as pressões confinantes são aplicadas através de câmaras de ar.

Figura 2.23. Equipamento proposto por Wu & Hong (1994).

Wu & Helwany (1996) propuseram um equipamento constituído basicamente por um elemento de solo reforçado, depositado em uma caixa rígida (Figura 2.24). O elemento de solo reforçado é composto por duas camadas de solo, pelo reforço e por duas placas de aço flexíveis que permitem que o solo e a inclusão deformem ao longo do tempo, quando da aplicação de um carregamento vertical constante na superfície da massa de solo reforçada.

Figura 2.24. Equipamento proposto por Wu & Helwany (1996).

As camadas de solo possuem uma altura (H) igual a 300 mm e o reforço possui um comprimento (L) igual a 450 mm. O acompanhamento das deformações do geotêxtil, ao longo do tempo, é feito através de *strain gages*. Além disso, a instrumentação é composta por células de carga, relógio comparador, transdutores de poro pressão (no caso de solo argiloso) e potenciômetros. A configuração geral da instrumentação é ilustrada na Figura 2.25.

Figura 2.25. Configuração geral da instrumentação (WU & HELWANY, 1996).

Os autores realizaram ensaios com dois tipos de solo (uma areia e uma argila) e um geotêxtil não tecido de polipropileno. Também foram realizados ensaios de fluência não confinada para permitir uma estimativa da deformação a ser obtida nos ensaios confinados.

A Tabela 2.1 sumariza as deformações obtidas no geotêxtil durante os ensaios realizados. A deformação estimada corresponde à deformação obtida com base em ensaios de fluência sem confinamento.

Tabela 2.1. Deformações no geotêxtil (WU & HELWANY, 1996).

Solo confinante	Tempo (min)	Localização no geotêxtil	Deformação estimada (%)	Deformação obtida (%)
Areia	43.200	Centro	13	3,5
		Extremidade	3,7	1,0
Argila	2.700	Centro	4,2	10,0
		Extremidade	1,4	3,2

Os dados indicam que a deformação por fluência foi superestimada para os ensaios com areia por um fator de, aproximadamente, 4. No caso dos ensaios com argila, entretanto, a deformação por fluência foi subestimada por um fator de, aproximadamente, 2,5. Verifica-se, portanto, a necessidade da consideração do confinamento na análise das deformações ao longo do tempo dos geotêxteis.

Percebe-se, também, que a deformação por fluência do reforço foi significativamente afetada pelas características do solo confinante.

Helwany & Shih (1998) propuseram um equipamento constituído por uma caixa com capacidade para acomodar um corpo de prova com dimensões de 200 x 300 x 300 mm (Figura 2.26). O elemento de solo reforçado é composto por um geotêxtil confinado entre duas camadas de solo, cada uma com 100 mm de espessura, e é solicitado através de duas bolsas de ar comprimido que aplicam uma tensão constante na base e no topo do corpo de prova. Uma bolsa de ar, posicionada na lateral 1 da caixa, possibilita ainda a aplicação de uma tensão confinante horizontal.

A lateral 1 é composta por uma face flexível constituída por uma chapa de aço com 0,5 mm de espessura. Essa face é conectada ao reforço através de uma garra no ponto A, e não está impedida de apresentar movimentação durante o ensaio,

permitindo a deformação do corpo de prova. A lateral 2 é fixa e não apresenta movimentação durante o ensaio. As demais laterais da caixa também são fixas, para garantir a manutenção do estado plano de deformação.

Uma célula de carga posicionada próxima à lateral 2 possibilita o registro da carga no ponto B do reforço. O ensaio é realizado aplicando-se uma tensão vertical ao longo do tempo e permitindo que o solo e reforço apresentem deformação de forma interativa. A carga no ponto B e o deslocamento da face no ponto A (obtidos através de relógio comparador) são registrados durante o ensaio.

Figura 2.26. Equipamento proposto por Helwany & Shih (1998).

Este equipamento possibilita o registro da carga, no entanto não permite a obtenção da deformação no reforço. Além disso, esse equipamento, diferentemente dos equipamentos apresentados anteriormente, possibilita a realização de ensaios de fluência e relaxação simultaneamente, denotando a sua importância visto que esses dois fenômenos ocorrem simultaneamente em estruturas de solo reforçado com geossintético.

Foram realizados ensaios com geotêxtil tecido de polipropileno e com dois diferentes solos: uma areia e uma argila, permitindo uma análise da influência do tipo de solo confinante.

As Figuras 2.27 e 2.28 apresentam os resultados obtidos para os ensaios realizados com areia e as Figuras 2.29 e 2.30 os ensaios realizados com argila.

Figura 2.27. Deslocamento lateral dependente do tempo à meia altura de face para ensaio com areia (HELWANY & SHIH, 1998).

Figura 2.28. Força axial dependente do tempo medida na extremidade do geotêxtil para ensaio com areia (HELWANY & SHIH, 1998).

Figura 2.29. Deslocamento lateral dependente do tempo à meia altura da face para ensaio com argila (HELWANY & SHIH, 1998).

Figura 2.30. Força axial dependente do tempo medida na extremidade do geotêxtil para ensaio com argila (HELWANY & SHIH, 1998).

Verifica-se, na Figura 2.27, uma significativa ocorrência de fluência, e a grande parte do deslocamento lateral ocorre nos primeiros 10 minutos após a aplicação do carregamento. Além disso, a taxa de deslocamento é decrescente com o tempo.

A Figura 2.28 mostra a variação da força axial medida na extremidade do geotêxtil com o tempo. Uma significativa relaxação de tensão ocorre; por exemplo, a máxima carga é aproximadamente 98 N após 1.400 minutos, depois disso, a carga decresce durante o período de interação solo-geotêxtil, para aproximadamente 86 N em 3.700 minutos, ou seja, 12% de decréscimo de carga em 2.300 minutos.

Para o ensaio realizado com argila verifica-se, na Figura 2.29, que a maior parte do deslocamento lateral ocorre nos primeiros 100 minutos, após a aplicação do carregamento. Nesse caso também ocorre relaxação de tensão.

A Figura 2.30 mostra a variação da força axial medida na extremidade do geotêxtil com o tempo na qual se percebe um decréscimo de, aproximadamente, 40 % na carga medida num período de 3.000 minutos.

Nestes ensaios, a deformação por fluência do reforço também foi significativamente afetada pelas características do solo confinante.

O equipamento desenvolvido por Costa (2004) foi baseado na idéia de que o princípio geral de funcionamento dos equipamentos nos quais o solo solicita o geotêxtil consiste em confinar o reforço entre camadas de solo, permitindo que ambos os materiais tenham liberdade para apresentar deformações ao longo do tempo. Nesses ensaios, uma tensão vertical é aplicada ao solo que, por sua vez, solicita o reforço.

A configuração inicial do equipamento foi concebida com base nos poucos aparelhos descritos na literatura para o mesmo fim, porém visando uma instrumentação mais abrangente do ensaio e uma análise mais ampla dos resultados. Destaca-se ainda que o aparelho foi desenvolvido visando a obtenção tanto da carga quanto da deformação no geotêxtil, visto que a carga atuante no

reforço é indispensável para realizar análises mais amplas sobre as deformações observadas em função do tempo.

A Figura 2.31 mostra a configuração do equipamento desenvolvido enquanto a Figura 2.32 mostra um esquema geral do mesmo. O equipamento é composto basicamente por uma caixa fixa a uma mesa de apoio, um conjunto de garras para a fixação do geotêxtil, um sistema para aplicação de tensões verticais à massa de solo e um sistema para a obtenção de deformações no geotêxtil. No equipamento, um geotêxtil com dimensões de 200 x 200 mm é confinado entre camadas de solo de 100 mm de espessura. As deformações no reforço podem ser obtidas considerando o comprimento total do corpo de prova (200 mm) ou em diferentes trechos do mesmo.

Este equipamento representa um avanço com relação aos tipos de equipamento presentes na literatura para o mesmo fim, pois tanto a carga quanto a deformação no reforço podem ser analisadas em função do tempo. Além disso, o equipamento permite a realização de ensaio apenas com o solo para a caracterização prévia da solicitação a ser transmitida pelo solo nos ensaios solo-reforço e também a realização de ensaios de relaxação do reforço.

Figura 2.31. Equipamento desenvolvido por Costa (2004).

Figura 2.32. Esquema geral do equipamento desenvolvido por Costa (2004).

Costa (2004) realizou ensaios em um geotêxtil tecido de polipropileno confinado entre camadas de areia. A Figura 2.33 apresenta os valores de deformação obtidos nos ensaios de fluência do reforço e as deformações no ensaio com o elemento de solo reforçado.

A Figura 2.33 mostra que o comportamento obtido no ensaio com o elemento de solo reforçado aproxima-se bem do comportamento observado nos ensaios convencionais de fluência do reforço. As diferenças entre os valores de deformação nas duas situações são esperadas, uma vez que a carga no ensaio com o elemento de solo reforçado apresenta um decréscimo ao longo do tempo.

Portanto, os resultados dos ensaios indicam que a simples presença de solo confinando o reforço não teve a capacidade de restringir as deformações do reforço ao longo do tempo em virtude de sua possível menor tendência à fluência em relação ao reforço.

No entanto, deve ser lembrado que esses resultados devem-se ao comportamento do solo, do reforço e das condições escolhidas para os ensaios. Neste caso, Costa (2004) realizou ensaios de fluência confinada utilizando um

geotêxtil tecido que, segundo Koerner (1998), é pouco influenciado pela presença de confinamento.

Figura 2.33. Comparação entre as deformações obtidas no ensaio com o elemento de solo reforçado e em ensaios de fluência (COSTA, 2004).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição do instrumental utilizado para realização dos ensaios de fluência confinada, incluindo-se as características dos materiais ensaiados e os principais procedimentos de preparação das amostras e execução dos ensaios.

3.1. Descrição do equipamento

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi projetado e desenvolvido por Costa (2004). Como nenhuma modificação foi feita no equipamento a sua descrição será baseada nos trabalhos publicados pela autora (COSTA, 2004; COSTA & BUENO, 2006). O projeto deste equipamento foi baseado na premissa de que tanto o solo como o geotêxtil deve ter liberdade para se deformar ao longo do tempo.

A configuração inicial do equipamento foi concebida com base nos poucos aparelhos descritos na literatura para o mesmo fim, porém visando uma instrumentação mais abrangente do ensaio e uma análise mais ampla dos resultados. Destaca-se ainda que o aparelho foi desenvolvido visando a obtenção tanto da carga quanto da deformação no geotêxtil, visto que a carga atuante no reforço é indispensável para realizar análises mais amplas sobre as deformações observadas em função do tempo.

Uma vista geral do equipamento é mostrada na Figura 3.1 enquanto uma representação esquemática do mesmo é apresentada na Figura 3.2. O equipamento é composto basicamente por uma caixa fixa a uma mesa de apoio, um conjunto de garras para a fixação do geotêxtil, um sistema para aplicação de tensões verticais à massa de solo e um sistema para a obtenção de deformações no geotêxtil. Neste equipamento, um geotêxtil com dimensões de 200 x 200 mm é confinado entre camadas de solo de 100 mm de espessura. As deformações no reforço podem ser obtidas em diferentes trechos do corpo-de-prova.

Figura 3.1. Vista geral do equipamento utilizado, desenvolvido por Costa (2004).

Este equipamento representa um avanço com relação aos tipos de equipamento presentes na literatura para o mesmo fim, pois tanto a carga quanto a deformação no reforço podem ser analisadas em função do tempo. Além disso, o equipamento permite a realização de ensaio apenas com o solo para a caracterização prévia da solicitação a ser transmitida pelo solo nos ensaios solo-reforço e também a realização de ensaios de relaxação do reforço.

Figura 3.2. Representação esquemática do equipamento (COSTA, 2004).

O funcionamento do equipamento pode ser compreendido a partir do detalhe mostrado na Figura 3.3. Inicialmente, a tensão vertical é aplicada às camadas de solo através das câmaras de ar pressurizado, resultando no desenvolvimento de tensões horizontais (F_{h1} e F_{h2}). A movimentação da parede causada pela ação de F_{h1} e F_{h2} é limitada pela presença do reforço, ligado à parede através da conexão “garra-pórtico”. Nesse mecanismo de interação, o geotêxtil apresenta deformação e permite o deslocamento da lateral móvel até a força no reforço atingir um valor igual a F_{h1} e F_{h2} .

Como a única ligação existente entre a parede da caixa e o reforço ocorre através da conexão “garra-pórtico”, a presença da célula de carga, posicionada entre

essa conexão e a garra, permite o registro da força resultante ($F_{h1} + F_{h2}$). A força resultante, proveniente da solicitação do solo na parede móvel, corresponde à força atuante no reforço no ponto A.

Figura 3.3. Princípio do mecanismo de transmissão de carga (COSTA, 2004).

3.1.1. Caixa de ensaios e sistema de garras

A estrutura móvel da caixa de ensaios abrange as paredes que compõem os lados 1 e 2 mostrados na Figura 3.4, bem como o respectivo pórtico. Cada parede é composta por duas chapas (inferior e superior) com 13 mm de espessura, 200 mm de largura e 95 mm de altura. Os pórticos são confeccionados a partir de cantoneiras de aço e possuem rolamentos que deslizam sobre a mesa de apoio, permitindo a movimentação das laterais 1 e 2. As paredes 1 e 2 não são ligadas aos lados 3 e 4 e estão apoiadas sobre blocos de aço para permitir o encaixe da câmara de ar inferior.

As laterais 3 e 4 são constituídas por perfis de aço tipo U com diferentes dimensões (perfil U1 – 76,2 x 38,1 x 6,55 mm, perfil U2 – 101,6 x 41,28 x 6,27 mm) e por uma cantoneira de 19,05 x 19,05 x 4,76 mm que servem de apoio para uma

placa de vidro com 30 mm de espessura. A utilização de vidro possibilita a visualização do corpo-de-prova e das câmaras de ar, facilitando a identificação de eventuais problemas durante a fase de execução dos ensaios. Alguns perfis metálicos (tipo U1) são empregados para permitir a ligação e o travamento dos lados 3 e 4.

Figura 3.4. Esquema da caixa de ensaios (a) vista lateral (b) vista superior (COSTA, 2004).

No que diz respeito ao sistema de fixação do geotêxtil, cada garra é composta por duas chapas de aço com 200 x 40 x 5 mm (largura, comprimento e espessura, respectivamente), conectadas através de parafusos com 3 mm de diâmetro.

3.1.2. Sistema para obtenção da deformação no geotêxtil

A obtenção da deformação no reforço é feita através da medida dos deslocamentos de hastes fixas à manta. Quatro hastes diferentes são utilizadas para acompanhar os deslocamentos de quatro pontos no reforço, permitindo a obtenção da deformação da manta em trechos distintos. Os deslocamentos das hastes são registrados mediante a utilização de relógios comparadores. A Figura 3.5 mostra as posições de fixação das hastes na manta.

Figura 3.5. Disposição das hastes na manta (sem escala; dimensões em cm).

As hastes utilizadas são confeccionadas em aço inox com 0,6 mm de diâmetro (utilizadas em tratamentos odontológicos). Essas hastes são lubrificadas com graxa de silicone e deslizam dentro de um tubo de proteção de aço inox, com diâmetro externo igual a 0,8 mm.

A fixação das hastes na manta é feita prendendo-se sua extremidade no ponto de medição do geotêxtil, utilizando-se uma membrana (Figura 3.6).

Figura 3.6. Detalhe de fixação da haste (sem escala).

Para a obtenção dos deslocamentos das hastes são utilizados relógios comparadores com curso de 50 mm e resolução de 0,01 mm. Os relógios comparadores não eram apoiados diretamente nas hastes, visto que a força de reação do relógio provocaria a flexão das mesmas. No sistema desenvolvido por Costa (2004), os relógios são colocados em posição inversa, de modo que o contato com a haste era feito utilizando-se a extremidade 1 do relógio (ver Figura 3.7), movendo-se o parafuso apoiado na extremidade 2. O parafuso utilizado nesse sistema possui rosca especial, com capacidade de movimentar peças com resolução de centésimo de milímetro.

Figura 3.7. Sistema de movimentação relógio-haste (COSTA, 2004).

Para evitar que o parafuso fosse girado em excesso, o que provocaria flexão da haste e, portanto, erro na leitura, utilizou-se um circuito elétrico que ascendia um

led quando o relógio entrava em contato com a haste. Detalhes desse sistema são mostrados na Figura 3.8.

Figura 3.8. Detalhes do sistema de leitura (a) movimentação relógio-haste (b) detalhe do parafuso com rosca de precisão (COSTA, 2004).

3.1.3. Obtenção da força atuante nas paredes

Nos ensaios com geotêxtil, a força atuante na lateral móvel 1 era obtida através de uma célula de carga posicionada entre a garra e o pórtico como esquematizado na Figura 3.3.

Nos ensaios apenas com solo, a célula era posicionada conforme o esquema de montagem ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9. Esquema do posicionamento da célula de carga nos ensaios apenas com solo (COSTA, 2004).

3.1.4. Sistema para aplicação da tensão vertical

Para aplicação da tensão vertical à massa de solo foram utilizadas duas câmaras pressurizadas com ar comprimido, posicionadas na base e no topo do corpo-de-prova. O dispositivo consistia de uma armação de alumínio à qual era fixada uma manta de borracha. A Figura 3.10 ilustra detalhes do dispositivo utilizado.

Para controlar a pressão foram utilizados manômetros com capacidade de 400 kPa e resolução de 2 kPa. A tensão aplicada pelo sistema foi aferida através de células de inclusão posicionadas em contato com a câmara. Valores bastante próximos foram registrados pelo manômetro e pela célula.

Figura 3.10. Detalhes do dispositivo utilizado para aplicação da tensão vertical (COSTA, 2004).

3.1.5. Acessórios utilizados para a preparação do material granular

A Figura 3.11 mostra o equipamento desenvolvido por Costa (2004) para a preparação do material granular nos ensaios.

Figura 3.11. Vista geral da “chuva de areia” (COSTA, 2004).

O equipamento é composto por um pórtico de aço, um reservatório no topo e um conjunto de peneiras localizadas sob este último, denominado difusor. O procedimento da chuva de areia consiste em liberar a areia armazenada no reservatório que atinge a caixa de ensaios após passar pelo difusor, o qual permite a obtenção de amostras mais homogêneas.

O reservatório possui dimensões de 200 x 200 x 200 mm, sendo dotado de um fundo composto por uma chapa perfurada que permite a liberação da areia através da abertura de uma escotilha. A Figura 3.12 mostra um esquema do difusor que é composto por duas peneiras de 200 x 200 mm, com abertura de 6 mm, defasadas 45° e distantes 45 mm entre si. O difusor é acoplado ao reservatório através de quatro barras rosqueadas.

Figura 3.12. Esquema do difusor (a) vista superior (b) corte AB (dimensões em mm)
(COSTA, 2004).

Para a realização dos ensaios neste trabalho, as amostras foram preparadas com densidade relativa igual a 100%. Para tanto, foram utilizadas chapas com orifícios de 4 mm (solos 1 e 4) e 13 mm (solo 3) de diâmetro e altura de queda igual a 650 mm.

3.1.6. Acessórios utilizados para a preparação dos solos finos

A compactação dos solos finos foi realizada em 8 camadas através de soquete mecânico. As principais características da compactação do solo são descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Características da compactação dos solos finos.

Massa do soquete	5 kg
Número de camadas	8
Volume de cada camada	1000 cm ³

Para a realização dos ensaios, as amostras foram preparadas com dois graus de compactação diferentes, 95% e 75%, e o teor de umidade considerado foi o teor de umidade ótimo ($\Delta w = \pm 2\%$). Também foi realizado um ensaio com teor de umidade do solo igual a 62%.

3.2. Geotêxteis e solos utilizados

3.2.1. Geotêxteis utilizados

Foram utilizados três geotêxteis não tecidos agulhados, sendo dois de polipropileno (PP) e um de poliéster (PET).

A Tabela 3.2 apresenta as principais características dos materiais, determinadas segundo a ABNT.

Tabela 3.2. Características dos geotêxteis utilizados.

Geotêxtil	Matéria Prima	Gramatura (NBR 12568)		Ensaio de tração (NBR 12824)	
		Valor médio [g/m ²]	C.V. [%]	Valor médio [kN/m]	C.V. [%]
1	PP	41,90	2,63	1,50	7,38
2	PP	74,90	1,60	4,39	3,58
3	PET	129	10,46	3,98	9,79

Também foram realizados ensaios de fluência sem confinamento para caracterizar os geotêxteis e permitir a comparação de resultados com os ensaios de fluência confinada.

As Figuras 3.13 a 3.15 mostram os resultados dos ensaios de fluência sem confinamento, realizados com base na NBR 15226. Os níveis de carregamentos

foram selecionados de acordo com o nível de carga registrado no reforço nos ensaios com o elemento de solo reforçado.

Figura 3.13. Resultados dos ensaios de fluência sem confinamento para o geotêxtil 1.

Figura 3.14. Resultados dos ensaios de fluência sem confinamento para o geotêxtil 2.

Figura 3.15. Resultados dos ensaios de fluência sem confinamento para o geotêxtil 3.

3.2.2. Solos utilizados

As curvas granulométricas dos solos utilizados, obtidas de acordo com a ABNT (NBR-7181/84), são apresentadas na Figura 3.16. As principais características de cada solo estão descritas separadamente a seguir.

Ensaio de compressão triaxial, realizados por Costa (2004), revelaram os valores de ângulo de atrito de pico mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Ângulo de atrito de pico obtido nos ensaios triaxiais para o Solo 1 (COSTA, 2004).

D_r (%)	σ_3 (kPa)	ϕ'_p (°)
100	50	39,9
	100	39,2
	200	38,2

3.2.2.2. Solo 2

O Solo 2 é uma argila silto-arenosa, proveniente de um corte de estrada da Rodovia Wilson Finardi (SP-191), que acessa a cidade de Araras. Os limites de Atemberg (liquidez e plasticidade) e a massa específica dos sólidos encontram-se na Tabela 3.4. Trata-se de um solo classificado como CL de acordo com o Sistema Unificado de Classificação.

Tabela 3.4. Características do Solo 2.

Característica	Valor
LL (NBR 6459/84)	46 %
LP (NBR 9180/84)	27 %
ρ_s (NBR 6508/84)	2,650 g/cm ³

A massa específica seca máxima ($\rho_{d, \max}$) e o teor de umidade ótimo (w_{ot}) para o solo 2, determinados segundo a NBR 7182/84, são 1,541 g/cm³ e 23%, respectivamente. Ensaio de compressão triaxial, realizados por Patias (2005), em corpos-de-prova compactados na w_{ot} e $\rho_{d, \max}$ revelaram os parâmetros de resistência mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais para o Solo 2 (PATIAS, 2005).

Tipo de ensaio	Parâmetro	Valor
UU (umidade de compactação)	c (kPa)	109,4
	ϕ (°)	22
CU (condição saturada)	c (kPa)	49,1
	ϕ (°)	17,2
	c' (kPa)	22,1
	ϕ' (°)	29,6

3.2.2.3. Solo 3

O solo 3 é uma areia grossa com pedregulho, mal-graduada e classificada como SP de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos. O coeficiente de não uniformidade do material é igual 2,43.

O índice de vazios máximo ($e_{\max}$) para a areia, obtido segundo a ABNT (NBR12004/90), é igual a 0,59, correspondendo a um peso específico seco mínimo ($\gamma_{d,\min}$) igual a 16,7 kN/m³. O índice de vazios mínimo ($e_{\min}$), determinado de acordo com a NBR12051/91, é igual a 0,53, equivalendo a um peso específico seco máximo ($\gamma_{d,\max}$) igual a 17,3 kN/m³. O peso específico dos sólidos é igual a 26,5 kN/m³.

3.2.2.4. Solo 4

O solo 4 é uma areia fina, mal-graduada e classificada como SP de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos. O coeficiente de não uniformidade do material é igual 1,63.

O índice de vazios máximo ($e_{\max}$) para a areia, obtido segundo a ABNT (NBR12004/90), é igual a 0,84, correspondendo a um peso específico seco mínimo ($\gamma_{d,\min}$) igual a 14,4 kN/m³. O índice de vazios mínimo ($e_{\min}$), determinado de acordo com a NBR12051/91, é igual a 0,68, equivalendo a um peso específico seco máximo ($\gamma_{d,\max}$) igual a 15,8 kN/m³. O peso específico dos sólidos é igual a 26,5 kN/m³.

3.3. Descrição dos ensaios realizados

3.3.1. Ensaios apenas com o solo

O equipamento utilizado permite a realização de ensaios utilizando apenas o solo (sem a utilização do reforço). Essa modalidade de teste possibilita acompanhar a força na parede móvel da caixa, causada por um carregamento vertical aplicado à massa de solo, à medida que as paredes se deslocam a uma velocidade constante. Um corpo-de-prova com 200 x 200 x 200 mm é utilizado no ensaio. A realização de ensaios apenas com solo é de suma importância, pois permite avaliar o comportamento do solo no mesmo equipamento utilizado nos ensaios de fluência com o elemento solo-reforço.

Nesta etapa, foram realizados ensaios apenas com os solos 1 e 2. A escolha foi feita levando-se em conta as características dos materiais, visto que o solo 1 trata-se de uma areia pura e o solo 2 de uma argila silto-arenosa, podendo-se avaliar a funcionabilidade do equipamento para dois materiais de comportamentos distintos.

Nos ensaios com o solo 1 uma única camada foi preparada com 200 mm de espessura. A preparação do ensaio era iniciada com uma limpeza da caixa. Em seguida, todas as superfícies que ficavam em contato com o material, ou seja, paredes de vidro, paredes móveis e borracha das câmaras de ar, eram lubrificadas aplicando-se uma fina camada do composto graxa de silicone + pó de PTFE (*Poly Tetra Fluoro Ethylene*) ou pó de Teflon (20%). A percentagem indicada corresponde ao peso do pó em relação ao peso total do composto (graxa + PTFE). A escolha

pela utilização do composto foi feita com base nos resultados apresentados por Costa (2004).

Nos ensaios realizados neste trabalho, as amostras de solo foram preparadas com densidade relativa igual a 100%. Para tanto, foi utilizada chapa com orifícios de 4 mm de diâmetro e altura de queda igual a 650 mm.

Para o solo 2, a preparação do corpo-de-prova era feita mediante compactação em 8 camadas de 2,5 cm de espessura.

Após a preparação do solo na caixa de ensaios, a câmara de ar superior era instalada e a tensão vertical aplicada. Em seguida, o motor era acionado produzindo a movimentação das paredes a uma velocidade constante igual a 1,0 mm/min. As leituras do relógio e da célula de carga eram efetuadas para deslocamentos de 0,3; 0,5; 1,0 mm e então para incrementos de 1 mm até a força registrada pela célula de carga atingir um valor mínimo.

3.3.2. Ensaios de fluência confinada

O processo da chuva de areia utilizado para dispor os solos 1, 3 e 4 era feito em duas etapas com o geotêxtil posicionado entre elas.

Para o solo 2, a preparação do ensaio era feita compactando-se o solo em 4 camadas. O geotêxtil era posicionado e as garras presas aos pórticos. As chapas superiores das paredes móveis eram posicionadas. Em seguida, efetuava-se a compactação das outras 4 camadas de solo.

Após a preparação do solo, a câmara superior era colocada e registravam-se as leituras dos relógios.

O ensaio era iniciado aplicando-se uma pressão na câmara de ar para provocar uma pré-carga no reforço de cerca de 1% de sua resistência à tração. Isso era conseguido mediante a leitura registrada pela célula de carga. Após aplicação da pré-carga, as leituras dos relógios comparadores eram registradas. Em seguida, a tensão vertical era aumentada até atingir o valor pretendido, em no máximo 60 s, registrando-se a leitura dos relógios comparadores para 1, 2; 5, 8, 15, 30 min e para 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72 e 96 h após a aplicação total da tensão vertical. A leitura da célula de carga era efetuada no mesmo intervalo de tempo.

3.4. Ensaios realizados

Os ensaios realizados são listados na Tabela 3.6 que mostra as principais características dos solos e dos geotêxteis utilizados.

Tabela 3.6. Ensaio realizados.

Designação	Geotêxtil	Solo	D _r (%)	w (%)	GC (%)	Tensão Vertical (kPa)	Velocidade (mm/min)
1	1	1	100	-	-	70	-
2						85	
3						100	
4	2	1	100	-	-	100	
5	3	1	100	-	-	100	
6	1	2	-	w _{ot.}	95	70	-
7						85	
8						100	
9				62	75	85	
10					-	50	
11	1	3	100	-	-	85	-
12	2					100	
13	3					100	
14	1	4	100	-	-	85	-
15	2					100	
16	3					70	
17	-	1	100	-	-	70	1,0
18						85	
19						100	
20	-	2	-	w _{ot.}	95	70	1,0
21						85	
22						100	

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa de ensaios.

4.1. Ensaios apenas com solo

Nesta etapa foram realizados ensaios com dois tipos de solo: um material granular (Solo 1) e um solo fino (Solo 2).

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os resultados obtidos nos ensaios realizados apenas com solo, mostrando os valores de carga versus deformação específica do corpo-de-prova. A carga corresponde à força resultante na lateral 1 registrada pela célula de carga. A deformação foi obtida com base no deslocamento de um relógio comparador, posicionado na região central da lateral 1.

Figura 4.1. Resultados dos ensaios apenas com o solo 1.

Figura 4.2. Resultados dos ensaios apenas com o solo 2.

Nota-se que a movimentação inicial da lateral da caixa provoca um decréscimo acentuado da tensão horizontal até atingir um valor mínimo, correspondente à ruptura do solo. Para o solo 1, a ruptura ocorre para uma deformação de, aproximadamente, 1%.

Tal comportamento é coerente ao se estabelecer uma analogia com muros de

arrimo convencionais. Neste tipo de estrutura, deslocamentos muito pequenos, da ordem de 0,1% da altura do muro (H), são suficientes para atingir o início da ativação do solo. Porém, após esse patamar ainda ocorre um decréscimo da tensão até um deslocamento correspondente a cerca de 1% da altura do muro (TOYOSAWA et al., 2002).

Os resultados dos ensaios realizados com o solo 1 permitem a estimativa dos coeficientes de empuxo ativo e em repouso do solo. Esses parâmetros são de suma importância no dimensionamento e análise de estabilidade de muros de arrimo. A Tabela 4.1 apresenta os valores dos coeficientes de empuxo ativo e em repouso do solo obtidos nos ensaios.

Para o cálculo dos coeficientes de empuxo para o solo 1 utilizou-se a expressão (4.1).

$$\sigma'_h = K \cdot \sigma'_v \quad (4.1)$$

Onde:

K – coeficiente de empuxo;

σ'_v – tensão vertical efetiva;

σ'_h – tensão horizontal efetiva.

Tabela 4.1. Coeficientes de empuxo ativo e em repouso do solo 1.

σ_v (kPa)	Coeficiente de empuxo em repouso (K_0)	Coeficiente de empuxo ativo (K_a)
70	0,265	0,148
85	0,270	0,149
100	0,285	0,150

A condição de empuxo em repouso é estabelecida quando as deformações laterais do solo são impedidas, enquanto a condição de empuxo ativo corresponde à ruptura do solo ($\sigma_{ha} = \sigma_{h,min.}$).

A tensão horizontal foi obtida através da divisão entre a força registrada no ensaio pela célula de carga e a área de atuação da tensão horizontal. Durante a realização dos ensaios, percebeu-se que as extremidades da lateral ficam livres do efeito da tensão vertical aplicada, Figura 4.3, e, portanto, a área sob influência do carregamento é inferior à área total disponível. Para considerar este efeito, o cálculo da tensão horizontal foi feito adotando-se uma área de influência equivalente a 80% da área total disponível.

Figura 4.3. Propagação da tensão vertical aplicada (COSTA, 2004).

A determinação analítica do coeficiente de empuxo ativo permite a obtenção do ângulo de atrito do solo para cada nível de tensão de acordo com a expressão (4.2). A Figura 4.4 apresenta a variação do ângulo de atrito com a tensão vertical aplicada.

$$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

ϕ – ângulo de atrito do solo.

Figura 4.4. Variação do ângulo de atrito no estado plano de deformação do solo 1 com a tensão vertical aplicada.

Percebe-se que o valor do ângulo de atrito pouco varia com o nível de tensão e, em geral, ele tende a diminuir com o aumento das tensões normais. O maior ângulo de atrito nos ensaios, em relação aos ensaios triaxiais pode ser decorrente da diferente trajetória de carregamento nas duas condições. As condições de

contorno deste ensaio se aproximam mais de um estado plano de deformação, embora ambas as paredes laterais da caixa possam se movimentar. Normalmente, para condição de estado plano de deformação, adota-se a expressão (4.3), de Bishop (1966), para estimar o ângulo de atrito com base em ensaios triaxiais:

$$\phi_{plano} = 1,1 \phi_{triaxial} \quad (4.3)$$

Considerando os ângulos de atrito obtidos em ensaios triaxiais realizados por Costa (2004), têm-se valores para o ângulo de atrito no estado plano variando entre 42 e 44°. Observa-se, então, que os valores encontrados são ligeiramente superiores aos valores obtidos pela expressão (4.3). A maior diferença observada foi de 12,4%.

Com relação aos coeficientes de empuxo em repouso estimados com base nos ensaios realizados, percebe-se que os valores foram cerca de 6 a 20% inferiores ao coeficiente de empuxo em repouso estimado através da expressão (4.4), de Jaky (1944), adotando-se um ângulo de atrito com base em ensaios triaxiais, expressão (4.3).

$$K_0 = 1 - \sen \phi \quad (4.4)$$

No que diz respeito aos coeficientes de empuxo ativo encontrados, os valores foram cerca de 17 a 25% inferiores ao coeficiente de empuxo ativo estimado através da expressão (4.2), adotando-se um ângulo de atrito com base em ensaios triaxiais.

As discrepâncias entre os valores encontrados para os coeficientes de empuxo podem ser justificadas caso o ângulo de atrito do solo, para as condições de

contorno do ensaio, seja maior do que o estimado com base na expressão (4.3). Diferenças de até 6° têm sido relatadas na literatura entre ângulo de atrito no estado plano e ângulo de atrito em ensaios triaxiais (BECKER et al., 1972).

Durante os ensaios apenas com o solo 2 foi observada a perda de contato entre as paredes móveis do equipamento e o maciço de solo, ou seja, o maciço se manteve estável mesmo sem a presença de escoramento, não apresentando deformações significativas mesmo com a movimentação das paredes. Tal comportamento pode ser verificado na Figura 2 visto que a partir de um deslocamento das paredes correspondente a, aproximadamente, 2% de deformação as cargas registradas pela célula são nulas.

Neste caso, verifica-se que as tensões horizontais registradas nos ensaios referem-se às tensões induzidas pelo processo de compactação durante a montagem do ensaio. A partir do momento em que se impõe a movimentação das paredes, essas tensões se dissipam e o maciço se mantém estável devido aos seus parâmetros de resistência.

É importante ressaltar que, como este solo apresenta coesão e ângulo de atrito, a condição de ruptura só poderá ocorrer para valores de tensão vertical superiores a um dado valor ($\gamma_{\text{solo}} \cdot z_0$). Nesta situação, o valor da tensão horizontal será nulo e o valor da profundidade z_0 pode ser obtido através da expressão (4.5) (BUENO & VILAR, 2004).

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{1}{K_a}} \quad (4.5)$$

Para a determinação dos parâmetros de resistência do solo 2, construíram-se

envoltórias de resistência para diferentes valores de deformação. A Figura 4.5 apresenta as envoltórias enquanto a Tabela 4.2 apresenta os parâmetros de resistência obtidos a partir das mesmas.

Figura 4.5. Envoltórias de resistência do solo 2 para diferentes deformações.

Tabela 4.2. Parâmetros de resistência do solo 2 para diferentes deformações.

Deformação (%)	c (kPa)	ϕ (°)
0,20	12,2	28
0,30	12,7	34
0,50	16,0	37

Os parâmetros de resistência do solo 2 permitem a estimativa da tensão vertical máxima que pode ser aplicada ao maciço sem que este atinja a condição de ativação, através da expressão (4.5). Considerando um peso específico do solo igual a 19 kN/m³ e adotando-se para valores de coesão e ângulo de atrito os obtidos para maiores deformações, teríamos uma tensão vertical máxima de, aproximadamente,

65 kPa. Entretanto, os valores utilizados nos ensaios são maiores do que a tensão vertical máxima obtida. Portanto, para situações em longo prazo, o maciço poderá apresentar deformações significativas e, conseqüentemente, atingir a condição de ruptura.

4.2. Ensaios de fluência confinada

4.2.1. Geotêxtil 1 (PP)

As Figuras 4.6 a 4.8 apresentam os resultados de ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 1, mostrando os valores para a deformação do reforço versus tempo. A deformação foi obtida com base nos deslocamentos observados nas hastes fixas à manta.

Em todos os ensaios, foram registradas deformações no decorrer do tempo, evidenciando que a presença do solo não eliminou a fluência do reforço. O sistema solo 1/geotêxtil 1 rompeu sob uma tensão vertical de 100 kPa após 16 minutos de ensaio e o sistema solo 4/geotêxtil 1 rompeu sob uma tensão vertical de 85 kPa após 10 minutos de ensaio.

Figura 4.6. Resultados dos ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 1.

Figura 4.7. Resultados dos ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 2.

Figura 4.8. Resultados dos ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solos 3 e 4 sob tensão vertical de 85 kPa.

Como os resultados dos ensaios de fluência confinada com o solo 1 e o solo 2 apresentam um eixo em comum, também é interessante representar os resultados obtidos, para cada tipo de solo, num diagrama tridimensional, como ilustram as Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4.9. Ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 1.

Figura 4.10. Ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 2.

No que diz respeito ao tipo de solo, a Figura 4.11 evidencia uma grande diferença entre as deformações totais obtidas nos ensaios com os diferentes tipos de solo e sob uma tensão vertical de 85 kPa.

Figura 4.11. Resultados de ensaios confinados pelos solos 1, 2 e 3 sob tensão vertical de 85 kPa – Geotêxtil 1.

Inicialmente, as diferenças nas deformações encontradas podem ser atribuídas ao tipo de solo visto que o material utilizado como reforço e a tensão vertical aplicada foram iguais. No entanto, é preciso analisar se a carga registrada no reforço em todos os ensaios é equivalente.

As Figuras 4.12 a 4.14 apresentam a variação da carga registrada no reforço com o tempo para os ensaios confinados com os solos 1, 2 e 3, respectivamente. Os valores da carga registrada no reforço estão expressos em porcentagem da resistência última à tração do reforço (% $T_{ult.}$).

Figura 4.12. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 1.

Figura 4.13. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 2.

Figura 4.14. Variação da carga com o tempo para o ensaio de fluência confinada – Geotêxtil 1 e Solo 3.

Percebe-se que a carga registrada nos ensaios com os solos 2 e 3 e tensão vertical de 85 kPa é equivalente. As diferenças nas deformações podem estar relacionadas ao tipo de solo. Neste caso, verifica-se a redução de 74,7% na deformação total do geotêxtil 1 no ensaio confinado com o solo 2 em comparação com o ensaio confinado com o solo 3.

Entretanto, para o ensaio com o solo 1 e tensão vertical de 85 kPa, a carga registrada foi cerca de 250% maior em comparação com os ensaios realizados com os solos 2 e 3. Já para uma tensão vertical de 70 kPa a carga registrada no ensaio com o solo 1 foi até 400% maior do que a registrada no ensaio com o solo 2. Assim, as maiores deformações encontradas para o solo 1 podem ser atribuídas a carga registrada no reforço, já que maiores cargas implicam em maiores deformações no reforço.

Os menores valores de carga registrados no reforço nos ensaios com o solo 2 podem ser atribuídos à pequena deformabilidade do solo nas condições dos ensaios

visto que, tanto nos ensaios apenas com solo como nos ensaios de fluência confinada, o maciço manteve-se estável mesmo sem a presença de escoramento.

O principal fator contribuinte para as pequenas deformações apresentadas nos ensaios com o solo 2, refere-se às características de resistência do solo, visto que este solo apresenta coesão e ângulo de atrito. Ensaaios apenas com solo revelaram ângulos de atrito entre 28 e 37° e coesão entre 12 e 16 kPa. Neste caso, além do ângulo de atrito, a presença de coesão contribui para o ganho de resistência do solo e torna as estruturas mais estáveis justificando a diminuição das deformações apresentadas pelos ensaios com o solo 2.

As Figuras 4.12 a 4.14 também permitem verificar a variação da força no decorrer do tempo, visto que a fluência reflete o comportamento dos materiais ao longo do tempo submetidos a um carregamento constante. Neste sentido, percebe-se que a carga registrada apresentou uma pequena variação durante os ensaios. A maior variação observada inicialmente ($t = 1$ min) ocorreu para o ensaio com o solo 2 e sob tensão vertical de 70 kPa, para o qual houve redução de 10% na carga após 10 h de ensaio.

4.2.2. Geotêxtil 2 (PET)

A Figura 4.15 apresenta os resultados dos ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 2 sob tensão vertical de 100 kPa, mostrando os valores para a deformação do reforço versus tempo. A deformação foi obtida com base nos deslocamentos observados nas hastes fixas à manta.

Figura 4.15. Resultados dos ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 2 e sob tensão vertical de 100 kPa.

No que se refere ao tipo de solo, houve grande variação da deformação obtida no ensaio com o solo 4 em comparação com as obtidas com os solos 1 e 3. Neste caso, torna-se interessante a análise em termos de carga registrada no reforço para cada um dos ensaios.

A Figura 4.16 apresenta a variação da carga registrada no reforço com o tempo para os ensaios realizados.

Figura 4.16. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 2 e sob tensão vertical de 100 kPa.

Percebe-se que as cargas registradas no reforço para os ensaios confinados com os solos 1 e 4 são bastante semelhantes. Portanto, as diferenças entre as deformações obtidas nos ensaios podem justificadas pela interação solo-reforço. Neste caso, houve redução de 50,1% na deformação total do geotêxtil 2 no ensaio confinado com o solo 1 em comparação com o ensaio confinado com o solo 4.

No entanto, a carga registrada no reforço no ensaio confinado com o solo 3 é cerca de 50% menor do que a carga registrada nos ensaios com os solos 1 e 4. Assim, as menores deformações obtidas nos ensaios com o solo 3 são devidas a menor carga registrada no reforço, já que menores cargas implicam em menores deformações no reforço.

No que se refere à variação da carga registrada no reforço no decorrer do tempo percebe-se que houve pequenas variações de carga durante os ensaios. A maior variação ocorreu para o ensaio com o solo 1 no qual houve redução de, aproximadamente, 12% na carga após 8 horas de ensaio.

4.2.3. Geotêxtil 3 (PP)

A Figura 4.17 apresenta os resultados dos ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 3 sob tensão vertical de 100 kPa, mostrando os valores para a deformação do reforço versus tempo. A deformação foi obtida com base nos deslocamentos observados nas hastes fixas à manta.

Figura 4.17. Resultados dos ensaios de fluência confinada utilizando-se o geotêxtil 3 e sob tensão vertical de 100 kPa.

Com relação ao tipo de solo, houve grande variação das deformações obtidas para os diferentes solos confinantes. Neste caso, também se faz necessária a análise em termos de carga registrada no reforço para cada um dos ensaios.

A Figura 4.18 apresenta a variação da carga registrada no reforço com o tempo para os ensaios realizados.

Figura 4.18. Variação da carga com o tempo para os ensaios de fluência confinada – Geotêxtil 3 e sob tensão vertical de 100 kPa.

Percebe-se que as cargas registradas no reforço para os ensaios confinados com os solos 1 e 4 são bastante semelhantes. Portanto, as diferenças de deformações obtidas nos ensaios são relativas ao comportamento solo-reforço. Neste caso, houve redução de 18,7% na deformação total do geotêxtil 1 no ensaio confinado com o solo 1 em comparação com o ensaio confinado com o solo 4.

Entretanto, a carga registrada no reforço no ensaio confinado com o solo 3 é cerca de 50% menor do que a registrada nos ensaios com os solos 1 e 4. Neste caso, as menores deformações obtidas nos ensaios com o solo 3 são devidas a menor carga registrada no reforço, já que menores solicitações implicam em menores deformações no reforço.

No que se refere à variação da carga registrada no reforço no decorrer do tempo percebe-se que houve pequenas variações de carga durante os ensaios. A maior variação ocorreu para o ensaio com o solo 1 no qual houve redução de, aproximadamente, 9,5% na carga.

Percebe-se, portanto, que houve variação de carga com o tempo para todos os ensaios de fluência confinada realizados. Neste caso, é importante notar que os mecanismos de deformação ao longo do tempo no caso de geossintéticos sob confinamento podem se desenvolver de formas diversas, a depender das características de cada estrutura, como tipo de solo e reforço. Pode ocorrer fluência de fato, isto é, deformações ao longo do tempo sob carga constante ou deformações ao longo do tempo com diminuição e/ou com acréscimo de carga.

Costa (2004) lembra que nem sempre a previsão das deformações ao longo do tempo de uma estrutura com base em ensaios de fluência convencionais do reforço estará de acordo com o comportamento observado, mesmo que a carga inicial no reforço seja conhecida. A realização de ensaios com elementos de solo reforçado é mais adequada e muito importante no sentido de investigação de possíveis mecanismos, mas diante da complexidade do problema, não necessariamente garante uma boa concordância entre previsão e comportamento observado nas estruturas. O comportamento observado nas estruturas ainda pode ser diferente devido às interações com outras camadas de reforço e demais componentes da estrutura.

4.3. Influência do grau de compactação e teor de umidade do solo 2

Com o objetivo de avaliar a influência do grau de compactação do solo 2 no comportamento tensão deformação do elemento de solo reforçado com o geotêxtil 1, foi realizado um ensaio com grau de compactação igual a 75% e tensão vertical de

85 kPa. A Figura 4.19 ilustra o resultado obtido.

Figura 4.19. Comparação entre grau de compactação do solo 2 – Solo reforçado com o geotêxtil 1.

Procedendo-se a um ajuste dos dados presentes nas Figuras 4.19, através da função logarítmica mostrada na expressão (4.6), é possível quantificar a susceptibilidade à fluência do geotêxtil. A Tabela 4.3 apresenta os resultados encontrados.

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln(t) \quad (4.6)$$

Onde:

ε – deformação total em %;

t – tempo em horas;

a, b – constantes obtidas pelo ajuste.

O valor de “a” corresponde à deformação, para $t = 1$ h, obtida pelo ajuste.

Portanto, verifica-se que para um grau de compactação correspondente a 75% ela foi cerca de 160% maior do que para um grau de compactação igual a 95%.

Através dos valores de “b” obtidos para os ajustes, pode-se dizer que a tendência a apresentar fluência foi inicialmente cerca de 390% maior para um grau de compactação igual a 75% do que para um grau de compactação igual a 95%.

Tabela 4.3. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
GC = 95%	0,794	0,028	0,983
GC = 75%	2,079	0,137	0,973

Também foi avaliada a influência do teor de umidade do solo 2 no comportamento tensão deformação do solo reforçado. Pretendeu-se com esta avaliação investigar o efeito de uma maior deformabilidade do solo no seu comportamento à fluência. Neste caso, foi realizado um ensaio com teor de umidade bastante elevado ($w = 62\%$) e tensão vertical igual a 50 kPa. A Figura 4.20 ilustra o resultado obtido.

Figura 4.20. Comparação entre teor de umidade do solo 2 – Solo reforçado com o geotêxtil 1.

Percebe-se uma diferença de comportamento bastante evidenciada. Para o ensaio com teor de umidade igual a 62% e tensão vertical de 50kPa, verifica-se um acréscimo de deformação em torno de 800% em comparação ao ensaio cujo teor de umidade corresponde ao teor de umidade ótimo e tensão vertical de 100 kPa.

Neste caso, o solo possui menor resistência ao cisalhamento, o que justifica o solo apresentar maiores deformações, até mesmo para níveis de tensão menores.

Para uma análise em termos de fluência, procedeu-se também a um ajuste dos dados obtidos, segundo uma relação deformação *versus* tempo. A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos de acordo com a expressão (4.6).

Tabela 4.4. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
w = 23% - 100 kPa	1,683	0,029	0,987
w = 62% - 50 kPa	15,310	0,196	0,935

Percebe-se que para um teor de umidade igual a 62% e tensão vertical de 50 kPa, a tendência à apresentar fluência do geotêxtil foi inicialmente cerca de 580% maior do que para um teor de umidade equivalente a 23% e tensão vertical igual a 100 kPa.

4.4. Influência do confinamento

4.4.1. Geotêxtil 1 (PP)

Com o intuito de verificar a influência do confinamento na fluência do geotêxtil 1, foram realizados ensaios de fluência não confinada com carregamentos compatíveis aos obtidos nos ensaios confinados.

As Figuras 4.21 a 4.23 apresentam resultados de ensaios com e sem confinamento para o geotêxtil 1.

Figura 4.21. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 1 e Solo 1.

Figura 4.22. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 1 e Solo 2.

Figura 4.23. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 1 e Solo 3.

Em alusão ao confinamento, percebe-se que sua presença realmente reduziu as deformações totais apresentadas pelo geotêxtil ao longo do tempo. Procedendo-se a um ajuste dos dados presentes nas Figuras 4.21 a 4.23, através da função logarítmica mostrada na expressão (4.6), é possível quantificar a susceptibilidade à fluência do geotêxtil. A Tabela 4.5 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.5. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
Não confinado – 35%	41,167	0,221	0,963
Confinado – Solo 1	15,855	0,107	0,941
Não confinado – 10%	15,620	0,165	0,983
Confinado – Solo 2	0,794	0,028	0,983
Confinado – Solo 3	3,127	0,106	0,941

Comparando-se os valores de “a”, referentes à deformação para $t = 1$ h, pode-se dizer que houve uma redução de 61,49% para o ensaio confinado com o solo 1, 94,92% para o ensaio confinado com o solo 2 e 79,98% para o ensaio confinado com o solo 3.

Através dos valores de “b” obtidos para os ajustes, referentes à tendência a apresentar fluência, pode-se dizer que houve uma redução de 51,58% para o ensaio confinado com o solo 1, 83,03% para o ensaio confinado com o solo 2 e 35,76% para o ensaio confinado com o solo 3.

4.4.2. Geotêxtil 2 (PET)

Para o geotêxtil 2 também foram realizados ensaios de fluência não confinada com carregamentos compatíveis aos obtidos nos ensaios confinados.

As Figuras 4.24 a 4.26 apresentam resultados de ensaios com e sem confinamento para o geotêxtil 2.

Figura 4.24. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 2 e Solo 1.

Figura 4.25. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 2 e Solo 3.

Figura 4.26. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 2 e Solo 4.

Percebe-se que a presença do confinamento também reduziu as deformações totais apresentadas pelo geotêxtil ao longo do tempo. Procedendo-se a um ajuste dos dados presentes nas Figuras 4.24 a 4.26, através da função logarítmica mostrada na expressão (4.6), é possível quantificar a susceptibilidade à fluência do

geotêxtil. A Tabela 4.6 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.6. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
Não confinado – 10%	11,434	0,094	0,961
Confinado – Solo 1	3,262	0,084	0,953
Confinado – Solo 4	6,686	0,129	0,933
Não confinado – 5%	9,200	0,083	0,971
Confinado – Solo 3	2,871	0,056	0,963

Comparando-se os valores de “a”, pode-se dizer que houve uma redução de 71,47% para o ensaio confinado com o solo 1, 68,79% para o ensaio confinado com o solo 3 e 41,53% para o ensaio confinado com o solo 4.

Através dos valores de “b” obtidos para os ajustes, pode-se dizer que houve uma redução de 10,64% para o ensaio confinado com o solo 1, 32,53% para o ensaio confinado com o solo 3 e um aumento de 37,23% para o ensaio confinado com o solo 4.

4.4.3. Geotêxtil 3 (PP)

Com o intuito de verificar a influência do confinamento na fluência do geotêxtil 3, também foram realizados ensaios de fluência não confinada com carregamentos compatíveis aos obtidos nos ensaios confinados.

As Figuras 4.27 a 4.29 apresentam resultados de ensaios com e sem confinamento para o geotêxtil 3.

Figura 4.27. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêxtil 3 e Solo 1.

Figura 4.28. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêtil 3 e Solo 3.

Figura 4.29. Comparação entre ensaio confinado e sem confinamento – Geotêtil 3 e Solo 4.

Nota-se que a presença do confinamento reduziu as deformações totais apresentadas pelo geotêtil ao longo do tempo. Procedendo-se a um ajuste dos dados presentes nas Figuras 4.27 a 4.29, através da função logarítmica mostrada na expressão (4.6), é possível quantificar a susceptibilidade à fluência do geotêtil. A Tabela 4.7 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.7. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
Não confinado – 10%	21,485	0,207	0,966
Confinado – Solo 1	7,607	0,082	0,952
Confinado – Solo 4	9,146	0,129	0,991
Não confinado – 5%	12,408	0,127	0,958
Confinado – Solo 3	4,348	0,077	0,978

Comparando-se os valores de “a”, pode-se dizer que houve uma redução de 64,59% para o ensaio confinado com o solo 1, 64,96% para o ensaio confinado com o solo 3 e 57,43% para o ensaio confinado com o solo 4.

Através dos valores de “b” obtidos para os ajustes, pode-se dizer que houve uma redução de 60,39% para o ensaio confinado com o solo 1, 39,37% para o ensaio confinado com o solo 3 e 37,68% para o ensaio confinado com o solo 4.

Portanto, apesar das diferenças entre os resultados obtidos, percebe-se que o confinamento realmente reduziu as deformações para os três geotêxteis ensaiados, ratificando a importância em considerá-lo no dimensionamento de estruturas de solo reforçado.

4.5. Fatores intervenientes da fluência confinada

Com o intuito de verificar a influência de alguns fatores na fluência confinada, tais como: tipo de solo confinante, tipo de polímero e gramatura do reforço, procedeu-se a uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes materiais utilizados no programa experimental.

Grande parte dos resultados é apresentada em gráficos de colunas em que o eixo das ordenadas representa a relação entre o valor de “b” no ensaio confinado e não confinado, obtidos pelo ajuste através da expressão (6).

4.5.1. Tipo de solo confinante

Com relação ao geotêxtil 1, a Figura 4.30 apresenta os resultados dos ensaios com os solos 1, 2 e 3 e tensão vertical de 85 kPa.

Figura 4.30. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 1.

Analisando-se os valores da Figura 4.30, verifica-se que o confinamento com o solo 1 resultou em uma redução de 51,58% na susceptibilidade à fluência, enquanto o solo 2 resultou em uma redução de 84,3% e o solo 3 uma redução igual a 40,3%.

Diante dos resultados obtidos, percebe-se que o confinamento com o solo 2 apresentou a maior redução nas deformações por fluência do geotêxtil 1. Uma justificativa para explicar esse fato refere-se à pequena deformabilidade apresentada pelo solo 2, visto que tanto nos ensaios apenas com o solo como nos ensaios de fluência confinada o maciço se manteve estável mesmo sem a presença de escoramento. Neste caso, a presença de coesão contribuiu para o ganho de resistência do solo, justificando a redução das deformações apresentadas pelos ensaios confinados com o solo 2.

No que se refere às reduções obtidas pelos ensaios confinados com os materiais granulares (solos 1 e 3), as diferenças podem ser explicadas pelas

diferentes características apresentadas pelos dois materiais.

As principais características que interferem na resistência das areias são: o índice de vazios (ou a compacidade relativa associada), a forma e a rugosidade dos grãos e a distribuição granulométrica (VILAR, 2004).

O solo 1 trata-se de uma areia média a fina, com coeficiente de não uniformidade (C_u) igual a 2,7. Como os ensaios foram realizados com $D_r = 100\%$, o índice de vazios equivalente é igual a 0,50, correspondendo a um peso específico seco igual a $17,7 \text{ kN/m}^3$.

Já o solo 3 é classificado como uma areia grossa com pedregulhos e coeficiente de não uniformidade (C_u) igual a 2,43. Como os ensaios foram realizados com $D_r = 100\%$, o índice de vazios equivalente é igual a 0,53, correspondendo a um peso específico seco igual a $17,3 \text{ kN/m}^3$.

De acordo com os resultados obtidos para o confinamento com os dois tipos de solo, verifica-se uma ligeira superioridade na redução obtida pelo confinamento com o solo 1.

Comparando as características de cada solo, verifica-se que o solo 1 possui um C_u ligeiramente maior. Este fato favorece o aumento da resistência do solo. No entanto, comparando-se os valores referentes ao índice de vazios para os dois tipos de solo, nota-se que o valor encontrado para o solo 3 é ligeiramente maior que o determinado para o solo 1. Neste caso, um índice de vazios maior contribui para o ganho de resistência do solo.

Portanto, não se pode atribuir os resultados apenas às características referentes ao solo confinante. É importante também atentar para o comportamento relativo à interação mecânica do geotêxtil com o solo que, por sua vez, depende da resistência de interface entre os dois materiais. Para o caso do geotêxtil 1, o melhor

desempenho foi obtido pelo confinamento com o solo 1.

Com relação ao geotêxtil 2, a Figura 4.31 apresenta os resultados dos ensaios com os solos 1, 3 e 4 e tensão vertical de 100 kPa.

Figura 4.31. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 2.

Analisando os valores da Figura 4.31, percebe-se que o confinamento com o solo 1 resultou em uma redução de 10,64% na tendência à fluência do reforço, enquanto o solo 3 apresentou uma redução de 32,53% e o solo 4 um aumento de 37,23%.

O solo 4 trata-se de uma areia média a fina, com coeficiente de não uniformidade (C_u) igual a 1,63. Como os ensaios foram realizados com $D_r = 100\%$, o índice de vazios equivalente é igual a 0,68, correspondendo a um peso específico seco igual a 15,8 kN/m³.

Neste caso, diferentemente do resultado obtido para o geotêxtil 1, a maior redução ocorreu para o confinamento com o solo 3 seguida pelo solo 1 e por um aumento com o solo 4.

Comparando as características de cada solo, o solo 1 possui um C_u maior que os solos 3 e 4. Este fato favorece o aumento da resistência do solo. No entanto, comparando-se os valores referentes ao índice de vazios para os dois tipos de solo, nota-se que o valor encontrado para o solo 4 é maior que o determinado para os solos 1 e 3. Neste caso, um índice de vazios maior contribui para o ganho de resistência do solo.

Portanto, novamente não se devem relacionar os resultados apenas às características referentes ao solo confinante. É importante atentar para o comportamento relativo à interação mecânica do geotêxtil com o solo.

Analisando-se o reforço utilizado, percebe-se que o geotêxtil 2 é de poliéster enquanto o geotêxtil 1 é de polipropileno. Portanto, como os geotêxteis são fabricados a partir de diferentes polímeros, podem-se esperar diferentes interações do geotêxtil com o solo. Neste caso, o confinamento com o solo 3 proporcionou maior redução nas deformações por fluência do geotêxtil 2.

Para o geotêxtil 3, a Figura 4.32 apresenta os resultados dos ensaios com os solos 1, 3 e 4 e tensão vertical de 100 kPa.

Figura 4.32. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 3.

Analisando os valores da Figura 4.32, percebe-se que o confinamento com o solo 1 resultou em uma redução de 60,39% na tendência à fluência do reforço, enquanto o solo 3 apresentou uma redução de 39,37% e o solo 4 uma redução de 37,68%.

Neste caso, a maior redução ocorreu para o confinamento com o solo 1 seguida pelos solos 3 e 4, respectivamente.

Os resultados encontrados são compatíveis aos encontrados nos ensaios confinados utilizando-se o geotêxtil 1. Neste caso, trata-se do mesmo tipo de reforço, porém de gramaturas diferentes.

4.5.2. Tipo de polímero

Resultados de ensaios de fluência sem confinamento, realizados por Costa & Bueno (2000) evidenciam uma maior tendência à fluência para o geotêxtil de polipropileno em comparação com o geotêxtil de poliéster. Para verificar esta evidência, as Figuras 4.33 e 4.34 apresentam os resultados de ensaios de fluência sem confinamento para os geotêxteis 2 e 3.

**Figura 4.33. Comparação entre ensaios de fluência sem confinamento – Geotêxteis 2 e 3
(5% da resistência à tração)**

Figura 4.34. Comparação entre ensaios de fluência sem confinamento – Geotêxteis 2 e 3 (10% da resistência à tração)

Procedendo-se a um ajuste dos dados nas Figuras 4.33 e 4.34 através da expressão logarítmica mostrada na expressão (4.6), é possível quantificar a susceptibilidade à fluência dos geotêxteis. A Tabela 4.8 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.8. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
PET – 5%	9,221	0,099	0,980
PP – 5%	12,429	0,144	0,983
PET – 10%	11,490	0,140	0,948
PP – 10%	21,453	0,179	0,974

Comparando-se os valores de “b” obtidos para os ensaios realizados com carga de 5% da resistência à tração, a tendência à fluência do geotêxtil de PP é cerca de 31% maior do que a do geotêxtil de PET. Já para os ensaios realizados com carga de 10% da resistência à tração, a tendência à fluência do geotêxtil de PP é cerca de 22% maior do que a do geotêxtil de PP.

Portanto, os resultados obtidos também evidenciam uma maior tendência à fluência do geotêxtil de polipropileno em comparação com o geotêxtil de poliéster.

Com o intuito de verificar o comportamento do geotêxtil de polipropileno e de poliéster na fluência confinada, as Figuras 4.35 a 4.37 apresentam uma comparação dos resultados obtidos para os ensaios realizados com os geotêxteis 2 e 3, com os solos 1, 3 e 4.

Figura 4.35. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – solo 1 e tensão vertical de 100 kPa (10% da resistência à tração).

Figura 4.36. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – solo 3 e tensão vertical de 100 kPa (5% da resistência à tração).

Figura 4.37. Comparação entre geotêxtil de poliéster (PET) e polipropileno (PP) – solo 4 e tensão vertical de 100 kPa (10% da resistência à tração).

Procedendo-se a um ajuste dos dados nas Figuras 4.35 a 4.37 através da expressão logarítmica mostrada na expressão (4.6), é possível quantificar a susceptibilidade à fluência dos geotêxteis. A Tabela 4.9 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4.9. Resultados dos ajustes utilizando a expressão (4.6).

Tipo de ensaio	Constantes		Coeficiente de determinação (R ²)
	a	b	
PET – solo 1	3,262	0,084	0,953
PP – solo 1	7,607	0,082	0,952
PET – solo 3	2,871	0,056	0,963
PP – solo 3	4,348	0,077	0,978
PET – solo 4	6,686	0,129	0,933
PP – solo 4	9,146	0,129	0,991

Comparando-se os valores de “b” obtidos para os ensaios com os solos 1 e 4, pode-se dizer que a tendência a apresentar fluência foi praticamente igual para os dois geotêxteis. Já para os ensaios com o solo 3, pode-se dizer que a tendência a apresentar fluência foi inicialmente cerca de 27% maior para o geotêxtil de polipropileno (PP).

Verifica-se, portanto, uma ligeira superioridade na tendência à fluência para o geotêxtil de polipropileno em comparação com o geotêxtil de poliéster para os ensaios com a presença de confinamento.

Ainda com relação ao tipo de polímero, a Figura 4.38 apresenta os resultados obtidos para a relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento para o geotêxtil 2 (PET) e o geotêxtil 3 (PP), para

três tipos de solo e sob tensão vertical de 100 kPa.

Figura 4.38. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxtil 2 (PET) e 3 (PP).

Analisando os valores da Figura 4.38, percebe-se que a maior contribuição do confinamento ocorreu para o geotêxtil 3 (PP), seguido pelo geotêxtil 2 (PET) para os três tipos de solo utilizados.

Para o solo 1, a redução foi de 10,64% para o geotêxtil 2 e 60,39% para o geotêxtil 3. Para o solo 3, a redução foi de 32,53% para o geotêxtil 2 e 39,37% para o geotêxtil 3. E, finalmente, para o solo 4, a redução foi de 37,23% para o geotêxtil 2 e 37,68% para o geotêxtil 3.

Como o geotêxtil de PET apresenta menor susceptibilidade à fluência em comparação ao geotêxtil de PP, este fato pode estar associado às menores reduções obtidas pelo confinamento. Resultados encontrados por McGown et al. (1982) também apresentaram menores reduções obtidas pelo confinamento para geotêxtil não tecido de PET em comparação com geotêxtil não tecido de PP.

4.5.3. Gramatura do reforço

Com relação à gramatura do reforço, a Figura 4.39 apresenta os resultados obtidos para o geotêxtil 1 (40 g/m²) e o geotêxtil 3 (70 g/m²), para os solos 1 e 3.

Figura 4.39. Relação entre os valores de “b” obtidos pelo ajuste para os ensaios confinados e sem confinamento – Geotêxteis 1 e 3 (PP).

Analisando-se os valores da Figura 4.39, verifica-se que a contribuição do confinamento para ambos os geotêxteis foi bastante parecida. Para o geotêxtil 3 a contribuição foi ligeiramente superior, 14,59% maior para o confinamento com o solo 1 e 9,17% maior para o confinamento com o solo 3.

Portanto, percebe-se que a gramatura do geotêxtil não teve influência significativa no comportamento à fluência do material.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Esta dissertação apresentou uma investigação da fluência de geotêxteis não tecidos através de ensaios confinados. O programa experimental permitiu a análise do comportamento à fluência confinada para diferentes solos confinantes. Foram utilizados três geotêxteis não-tecidos agulhados, sendo dois de polipropileno (PP) e um de poliéster (PET). Além disso, também foram realizados ensaios de fluência convencional com o mesmo nível de carregamento registrado nos ensaios confinados para permitir uma comparação entre os mesmos.

Com base nos resultados obtidos, o presente trabalho permite concluir que:

- ♦ A realização de ensaios apenas com solo permitiu a estimativa dos parâmetros de resistência dos solos 1 e 2 no mesmo equipamento de ensaios de fluência confinada;
- ♦ Verificou-se que para um grau de compactação igual a 75% a tendência à fluência do geotêxtil 1 confinado no solo 2 foi inicialmente cerca de 390% maior do que para um grau de compactação equivalente a 95%;

- ◆ O aumento no teor de umidade na compactação do solo 2 manifestou um acréscimo acentuado nas deformações do geotêxtil 1 ao longo do tempo;
- ◆ O confinamento realmente reduziu as deformações para os três geotêxteis ensaiados, ratificando a importância em considerá-lo no dimensionamento de estruturas de solo reforçado;
- ◆ No que se refere ao tipo de solo confinante, a maior contribuição do confinamento na tendência à fluência dos geotêxteis 1 e 3 foi obtida pelo confinamento com o solo 1 e para o geotêxtil 2 foi obtida com o solo 3;
- ◆ Com relação ao tipo de polímero, a maior contribuição do confinamento ocorreu para o geotêxtil 3 (PP), seguido pelo geotêxtil 2 (PET) para os três tipos de solo utilizados;
- ◆ A gramatura do geotêxtil não teve influência significativa no comportamento à fluência do material. Para o geotêxtil 3 a contribuição foi ligeiramente superior, 14,59% maior para o confinamento com o solo 1 e 9,17% maior para o confinamento com o solo 3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT (1984) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
2. ABNT (1984) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR6508 – Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
3. ABNT (1984) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR7181 – Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro.
4. ABNT (1984) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR7182 – Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
5. ABNT (1984) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR9180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

6. ABNT (1990) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12004 – Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro.
7. ABNT (1991) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12051 – Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro.
8. ABNT (1991) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12553 – Geossintéticos – Terminologia. Rio de Janeiro.
9. ABNT (1992) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12568 – Geossintéticos – Determinação da massa por unidade de área. Rio de Janeiro.
10. ABNT (1993) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12824 – Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não-confinada – Ensaio de tração de faixa larga. Rio de Janeiro.
11. ABNT (2005) Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR15226 – Geossintéticos – Determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada. Rio de Janeiro.
12. ALLEN, T. M. (1991). Determination of long-term strength of geosynthetics: A state-of-the-art review. In: Geosynthetics' 91. Proceedings. Atlanta, v.1, p.351-379.

13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). ASTM D 5262 – Standard test method for evaluating the unconfined tension creep behavior of geosynthetics.
14. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2003). ASTM 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.
15. BALLEGEER, J. P.; WU, J. T. H. (1993). Intrinsic confined and unconfined load-deformation properties of geotextiles. In: CHENG, S. J. C. Geosynthetics soil reinforcement testing procedures. Philadelphia. p.16-31.
16. BARAS, L. C. S. (2001). Estudo da fluência em geotêxteis através de ensaios não confinados convencionais e acelerados. São Carlos. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
17. BECKER, E., CHAN, C. K., SEED, H. B. (1972). Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials in Plane Strain and Triaxial Compression Tests, Report TE-72-3, Office of Research Services, University of California, Berkeley, CA.
18. BISHOP, A. W. (1966). The strength of soils as engineering materials. Geotechnique, v.16, n.2, p.89-130.

19. BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1991). BS 6906-5. Methods of test for geotextiles. Determination of creep. London.
20. BUENO, B. S.; COSTANZI, M. A.; ZORNBERG, J. G. (2005). Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles. *Geosynthetics International*, v.12, n.6, p.276-287.
21. BUENO, B. S.; VILAR, O. M. (2004). *Mecânica dos Solos*, Departamento de Geotecnia, EESC-USP.
22. CAZZUFFI, D.; GHINELLI, A.; SACCHETTI, M.; VILLA, C. (1997). European experimental approach to the tensile creep behavior of high-strength geosynthetics. In: *Geosynthetics' 97. Proceedings*. Califórnia, v.1, p.253-266.
23. COSTA, C. M. L. (1999). *Fluência em geotêxteis*. São Carlos. 97 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
24. COSTA, C. M. L. (2004). *Deformações dependentes do tempo em muros de solo reforçado com geotêxteis*. São Carlos. 330 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
25. COSTA, C. M. L.; BUENO, B. S. (2000). Fluência de geotêxteis não tecidos. *Solos e Rochas*, v.23, n.3, p.235-246.

26. COSTA, C. M. L.; BUENO, B. S. (2001). Construção de um equipamento para a avaliação do comportamento dependente do tempo de elementos de solo reforçado com geossintéticos. Revista Solos e Rochas, trabalho submetido em março de 2006.
27. COSTANZI, M. A. (2003). Emprego do método SIM para obtenção das curvas isócronas e de ruptura por fluência. São Carlos. 82 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
28. DEN HOEDT, G. (1986). Creep and relaxation of geotextile fabrics. Geotextiles and Geomembranes, v.4, n.2, p.83-92.
29. GOTTARDI, G.; SIMONINI, P. (2000). Time and temperature effects on the behavior of geosynthetics-reinforced walls. In: EuroGeo 2000, European Geosynthetics Conference, 2nd. Proceedings. Bologna, v.1, p.175-180.
30. HELWANY, M. B. (1993). Long-term soil-geosynthetic interaction in geosynthetic-reinforced soil structures. Denver. 265 p. Tese (Doutorado) – University of Colorado at Denver.
31. HELWANY, S. M. B.; SHIH, S. (1998). Creep and stress relaxation of geotextile-reinforced soils. Geosynthetics International, v.5, n.4, p.425-434.

32. HSUAN, Y. G.; YEO, S. S. (2005). Comparing the creep behavior of high density polyethylene geogrids using two acceleration methods. In: Geo-Frontiers 2005, Slopes and Retaining Structures Under Seismic and Static Conditions (GSP 140). Proceedings. Austin, Texas, USA.
33. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1998). ISO 13431 – Geotextile and geotextile related products – Determination of tensile creep and creep rupture behavior. Switzerland.
34. JEWELL, R. A.; GREENWOOD, J. H. (1988). Long term strength and safety in steep soil slopes reinforced by polymer materials. Geotextiles and Geomembranes, v.7, p.81-118.
35. KOERNER, R. M. (1998). Designing with geosynthetics. New Jersey, Prentice Hall, 4th Ed.
36. KOERNER, R. M.; LORD, A. E. Jr.; HALSE, Y. H. (1988). Long term durability and aging of geotextiles. Geotextiles and Geomembranes, v.7, p.147-158.
37. LEVACHER, D.; BLIVET, J. C.; MSOUTI, F. (1994). Tensile and creep behavior of geotextiles. In: Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 5th. Proceedings. Singapore, v.3, p.1131-1134.

38. MATICHARD, Y.; LECLERQ, B.; SEGOUIN, M. (1990). Creep of geotextiles: soil reinforcement applications. In: Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 4th. The Hague, 1990. Proceedings. Rotterdam, Balkema, v.2, p.661-665.
39. McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; KABIR, M. H. (1982). Load-extension testing of geotextiles confined in soil. In: International Conference on Geotextiles, 2nd. Proceedings. Las Vegas, v.3, p.793-798.
40. McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; MURRAY, R. T. (1986). The load-strain-time-temperature behavior of geotextiles and geogrids. In: International Conference on Geotextiles, 3rd. Proceedings. Vienna, v.3, p.707-712.
41. McGOWN, A.; ANDRAWES, K. Z.; PRADHAN, S.; KHAN, A. J. (1998). Limit state design of geosynthetic reinforced soil structures. In: International conference on Geosynthetics. Geotextiles, 6th. Proceedings. Atlanta, v.1, p.143-179.
42. MIKI, H.; HAYASHI, Y.; YAMADA, K.; TAKASAGO, T.; SHIDO, H. (1990). Plane strain tensile strength and creep of spun-bonded non woven. In: Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 4th. The Hague, 1990. Proceedings. Rotterdam, Balkema, v.2, p.667-672.

43. MSOUTI, M. F.; BLIVET, J. C.; LEVACHER, D. (1997). Comportement au fluage des geotextiles en renforcement mécanique. Études et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, GT n.63.
44. PATIAS, J. (2005). Avaliação do uso de solos não convencionais em estruturas de solo reforçado. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
45. REDDY, D. V.; BUTUL, B. (1999). A Comprehensive Literature Review of Liner Failures and Longevity. In: Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management University of Florida.
46. RIMOLDI, P.; MONTANELLI, F. (1993). Creep and accelerated creep testing for geogrids. In: Geosynthetics' 93, Vancouver, 1993. Proceedings, v.2, p.773-785.
47. SHRESTHA, S. C.; BELL, J. R. (1982). Creep behavior of geotextiles under sustained loads. In: International Conference on Geotextiles, 2nd. Proceedings. Las Vegas, v.3, p.769-774.
48. THORNTON, J. S.; ALLEN, S. R.; THOMAS, R. W. (1997). Approaches for the prediction of long term viscoelastic properties of geosynthetics from short term tests. In: Geosynthetics' 97. Proceedings. California, v.1, p.277-291.

49. THORNTON, J. S.; ALLEN, S. R.; THOMAS, R. W.; SANDRI, D. (1998). The stepped isothermal method for time-temperature superposition and its application to creep data on polyester yarn. In: International Conference on Geosynthetics, 6th. Proceedings. Atlanta, v.2, p.691-698.
50. TOYOSAWA, Y.; HORII, N.; TAMATE, S.; SUEMASA, N.; KATADA, T.; ICHIKAWA, T. (2002). Lateral earth pressures with wall movements in centrifuge tests. In: Physical Modeling in Geotechnics. Proceedings. Canada, p. 881-885.
51. TUPA, N.; PALMEIRA, E. M. (1995). Comportamento de geotêxteis não-tecidos confinados em solos finos. In: Geossintéticos 95. Anais. São Paulo, p.139-147.
52. VILAR, O. M. (2004). Resistência ao cisalhamento. No prelo.
53. WU, J. T. H.; HELWANY, S. M. B. (1996). A performance test for assessment of long-term creep behavior of soil-geosynthetic composites. Geosynthetics International, v.3, n.1, p.107-124.
54. WU, C. S.; HONG, Y. S. (1994). Creep behavior of geotextile under confining stress. In: Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 5th. Proceedings. Singapore, v.3, p.1135-1138.