

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO CARGA-ALONGAMENTO**  
**DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS SUBMETIDOS**  
**À TRAÇÃO CONFINADA**

**MARIANNA JACOMINY DE AMORIM MENDES**

**ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM-142/06**

**BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO / 2006**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO CARGA-ALONGAMENTO  
DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS SUBMETIDOS  
À TRAÇÃO CONFINADA**

**MARIANNA JACOMINY DE AMORIM MENDES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MAURICIO ABRAMENTO, PhD (FAAP / USJT)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 22 DE FEVEREIRO DE 2006.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MENDES, MARIANNA JACOMINY DE AMORIM

Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis Não Tecidos Submetidos à Tração Confinada. [Distrito Federal] 2006

xxi, 152 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2006)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Geotêxteis

2. Tração confinada

3. Impregnação

4. Danos Mecânicos

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENDES, M.J.A. (2006). Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis Não Tecidos Submetidos à Tração Confinada. Dissertação de Mestrado. Publicação G.DM-142/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 152 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marianna Jacominy de Amorim Mendes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Comportamento Carga-Alongamento de Geotêxteis Não Tecidos Submetidos à Tração Confina.

GRAU / ANO: Mestre / 2006

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Marianna Jacominy de Amorim Mendes  
Av. T-05 Qd. 118 Lotes 1 e 2 casa 6 Setor Bueno  
Cep.: 74230-040 Goiânia - GO

Aos meus pais, Mauro e Marizany,  
meus apoios, exemplos de sabedoria e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Mauro e Marizany, meus exemplos de dedicação e equilíbrio, pelo amor incondicional, apoio constante em todos os aspectos, e principalmente pelas conversas filosóficas discutindo futuro, metas, objetivos, ações e realizações.

Aos meus irmãos, Marcela e Mauro Caetano, exemplos de determinação, agradeço pela força, companhia, e pelo carinho.

Ao meu orientador, Ennio Marques Palmeira pela orientação da dissertação, tranqüilidade, paciência, tempo, incentivo e por fim, pelo exemplo de sabedoria, dedicação e organização. Sem este apoio, eu não poderia chegar ao resultado final com tanta tranqüilidade e segurança.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Geotecnia da UnB agradeço pelos ensinamentos transmitidos, as contribuições na minha pesquisa e o apoio nos momentos necessários.

À Lílian Ribeiro de Rezende, por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa. Agradeço, também, pelo incentivo durante todo o período do mestrado.

Aos meus amigos e familiares de Goiânia, que torceram por mim durante todo o tempo em que estive ausente, pelas mensagens de apoio e pelos fins de semana de descanso e descontração.

À toda turma do mestrado, pela união, amizade, diversão e companhia. À Joice, pela amizade e disponibilidade em me ajudar a qualquer hora, sem medir esforços para isto; Priscila e Wallace, pelo carinho e amizade com todos os colegas e pela preocupação e apoio nos momentos difíceis; à Sandra pela amizade, pelas aulas de espanhol e “viagens” gastronômicas; ao James, pela sua alegria e ajuda em vários ensaios; à Jenny, exemplo de coragem e à Isabella, exemplo de dedicação.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, especialmente à Íris Luna, pela amizade, companheirismo e disponibilidade em ajudar, seja indicando um artigo interessante, emprestando um livro ou simplesmente se fazendo presente nas horas mais importantes.

Aos colegas e amigos do Grupo de Geossintéticos pela união, ajuda mútua, e troca de conhecimentos. Ao Newton e Nestor Tupa, que me ajudaram a montar o equipamento da pesquisa, à Maruska, pela ajuda nos procedimentos de ensaio, à Aline, ao Gregório e ao Helber pela amizade.

Ao Evaldo Matheus pela troca de experiências com o equipamento e por fornecer referências bibliográficas importantes para a pesquisa.

Aos técnicos do laboratório de Geotecnia da UnB, em especial Alessandro, Vanilson, e Raquel, por terem me auxiliado em tantos ensaios, contribuindo para um bom rendimento da pesquisa.

Ao Sr. José Gonçalves, do CME (Centro de Manutenção de Equipamentos da UnB), que me ajudou na manutenção do equipamento de tração confinada, pela eficiência e pelo exemplo de apego à profissão. Um agradecimento especial por sua amizade e consideração.

Ao Sr. Severino do Laboratório de Estruturas, sempre disposto a contribuir com os alunos de qualquer área.

À Bidim-BBA pelo fornecimento dos geotêxteis utilizados na pesquisa.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

À Universidade de Brasília, por incentivar a pesquisa científica.

À todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para execução e finalização deste trabalho.

## RESUMO

O uso de geossintéticos em estruturas de solo reforçado é uma técnica que vem sendo cada vez mais usada devido à rapidez, facilidade de execução e economia. A escolha do geossintético a ser empregado depende das suas características de resistência e rigidez serem compatíveis com as características da obra. A mobilização de esforços de tração nos reforços geossintéticos depende da rigidez desses materiais. Em geotêxteis não tecidos, reforços extensíveis, são necessários deslocamentos maiores da estrutura reforçada para a mobilização dos esforços de tração, enquanto que em reforços mais rígidos, são necessários deslocamentos menores para a mobilização dos mesmos esforços de tração. Por esse motivo tais reforços têm sido usados preferencialmente em estruturas de solo reforçado. No entanto, relatos da literatura técnica mostram que obras antigas de estruturas de arrimo reforçadas com geotêxteis vêm se comportando bem, com poucas deformações devido ao incremento de rigidez que o confinamento do solo proporciona ao reforço.

Com o intuito de verificar os efeitos do confinamento no comportamento carga-alongamento de geotêxteis *não tecidos* (onde o efeito do confinamento é mais pronunciado), foram feitos ensaios de tração confinada em equipamento desenvolvido na Universidade de Brasília, variando-se a gramatura do geotêxtil, a tensão confinante e o solo de confinamento. Verificou-se que a rigidez à tração é maior para geotêxteis de gramatura maior, mas o *incremento* relativo de rigidez devido ao confinamento é maior para aqueles de gramatura menor. A relação entre a rigidez à tração e a tensão confinante se ajustou bem a uma função linear, cujos coeficientes angulares foram maiores para menores níveis de deformação do geotêxtil. Com relação ao solo de confinamento, não foram verificadas diferenças significativas de comportamento carga-alongamento em amostras confinadas em materiais diferentes.

Por meio de ensaios com amostras impregnadas, verificou-se que a impregnação potencializou o efeito do confinamento, mas a relevância da impregnação no incremento de rigidez variou de acordo com a gramatura e tensão confinante dos geotêxteis e com o material impregnado. Os resultados dos ensaios com amostras danificadas comprovam que tanto a dimensão quanto a forma dos danos alteram a rigidez dos geotêxteis.

Em geral, constatou-se a importância em considerar os efeitos do confinamento para melhorar os parâmetros de projeto e ampliar a utilização de geotêxteis em estruturas de solo reforçado.

## ABSTRACT

The use of geosynthetics in reinforced soil structures has shown a marked increase due to its simplicity, speed and cost-effectiveness. The choice of the geosynthetics depends on the compatibility between the mechanical properties of the geosynthetics and the characteristics of the project. The tensile force mobilisation in the reinforcement depends on its tensile stiffness. For extensible reinforcements, such as non woven geotextiles, greater deformation of the structure will be needed in order to mobilise significant tensile forces, whereas for stiff reinforcements, such as some grids and woven geotextiles, less deformations will be required to mobilise the same tensile forces. Because of that, the latter reinforcements have been preferred in reinforced soil structures. Nevertheless, reports in the literature shows that old non woven geotextile reinforced structures have performed well, with little deformation over the years because of the increases in tensile stiffness caused by the confinement of the geotextile by the surrounding soil.

This dissertation aimed to verify the effects of in-soil confinement of non woven geotextiles on its load-deformation behaviour, using a test apparatus developed at the University of Brasília, varying the geotextile mass per unit area, confining stress and confining material. It was observed that the geotextile tensile stiffness is greater for heavier geotextiles, but the relative increase of stiffness is more significant for light geotextiles. The relation between tensile stiffness and confining stress was linear, with greater values of fitting coefficients for lower deformation levels. No relevant differences on the geotextile load-deformation behaviour were observed for the use of different confining materials.

Tests on geotextiles impregnated with granular materials showed that soil impregnation increases the effects of confinement, but the influence of impregnation depends on the geotextile mass per unit area and on the confining stress. The results of tests on damaged geotextile specimens showed that both the dimension and the shape of the damage affect the stiffness of the geotextile.

In general, the results showed the importance of considering the effects of confinement to improve the design parameters and to increase the use of non woven geotextiles in reinforced soil structures.



|   |    |
|---|----|
| <i>CAPÍTULO 1</i> .....   | 1  |
| 1. Introdução .....   | 1  |
| 1.1. Motivação da Pesquisa.....   | 1  |
| 1.2. Objetivos .....  | 2  |
| 1.3. Metodologia .....  | 2  |
| 1.4. Estrutura da dissertação .....   | 3  |
| <br>  |    |
| <i>CAPÍTULO 2</i> .....   | 5  |
| 2. Revisão Bibliográfica.....   | 5  |
| 2.1. Geossintéticos em Estruturas de Solos Reforçados .....                             | 5  |
| 2.2. Deformabilidade de Estruturas de Solo Reforçado.....                               | 8  |
| 2.3. Casos Históricos de Solos Reforçados com Geotêxteis.....                           | 10 |
| 2.4. Determinação das Propriedades Relevantes de Geossintéticos para Reforço de Solos.. | 13 |
| 2.4.1. Ensaio de Tração em Isolamento .....   | 14 |
| 2.4.2. Ensaio de Interação Solo-geossintético.....                                      | 17 |
| 2.4.2.1. Ensaio de Cisalhamento Direto.....   | 18 |
| 2.4.2.2. Ensaio de Arrancamento .....   | 19 |
| 2.4.2.3. Ensaio de Tração Confinada .....   | 20 |
| 2.5. Fatores que Influenciam a Rigidez à Tração dos Geotêxteis Confinados .....         | 26 |
| 2.5.1. Influência do Tipo de geossintético .....  | 27 |
| 2.5.2. Influência da Gramatura.....   | 29 |
| 2.5.3. Influência da Tensão Confinante .....  | 30 |
| 2.5.4. Influência do Material Confinante .....  | 32 |
| 2.5.5. Influência da Impregnação.....   | 33 |
| 2.5.6. Influência dos Danos mecânicos.....  | 35 |
| <br>  |    |
| <i>CAPÍTULO 3</i> .....   | 39 |
| 3. Equipamento e Materiais .....  | 39 |
| 3.1. Equipamento para Ensaio de Tração Confinada.....                                   | 39 |
| 3.2. Materiais Utilizados.....  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 3.2.1. Geotêxteis .....   | 44 |
| 3.2.2. Materiais Confinantes .....                              | 47 |
| 3.2.2.1. Areia Leighton Buzzard 14/25 .....                     | 48 |
| 3.2.2.2. Areia do Rio Corumbá .....                             | 49 |
| 3.2.2.3. Areia CAESB .....                                      | 50 |
| 3.2.2.4. Blocos de Madeira .....                                | 52 |
| 3.2.3. Materiais Granulares para Impregnação .....              | 52 |
| 3.2.3.1. Microesferas de Vidro .....                            | 53 |
| 3.2.3.2. Areia Fina do Rio Corumbá .....                        | 54 |
| <br>  |    |
| <i>CAPÍTULO 4</i> .....   | 56 |
| 4. Metodologia da Pesquisa .....                                | 56 |
| 4.1. Metodologia do Ensaio .....                                | 56 |
| 4.1.1. Preparação das Amostras de Geotêxtil .....               | 56 |
| 4.1.1.1. Amostras Virgens .....                                 | 56 |
| 4.1.1.2. Amostras Impregnadas com Material Granular .....       | 57 |
| 4.1.1.3. Amostras com Danos Mecânicos Induzidos .....           | 59 |
| 4.1.2. Procedimento de Ensaio .....                             | 60 |
| 4.2. Determinação das Curvas Relevantes .....                   | 62 |
| 4.2.1. Curva Carga de tração x Deformação .....                 | 63 |
| 4.2.2. Curva Rigidez x Deformação .....                         | 64 |
| 4.3. Repetibilidade dos Resultados .....                        | 65 |
| <br>  |    |
| <i>CAPÍTULO 5</i> .....   | 70 |
| 5. Resultados e análises .....                                  | 70 |
| 5.1. Ensaios com geotêxteis virgens .....                       | 70 |
| 5.1.1. Análise da Influência da gramatura .....                 | 71 |
| 5.1.2. Análise da Influência da tensão confinante .....         | 78 |
| 5.1.3. Análise da Influência da interface de confinamento ..... | 84 |
| 5.2. Ensaios com amostras impregnadas .....                     | 90 |
| 5.2.1. Análise da Influência do grau de impregnação .....       | 91 |
| 5.2.2. Análise da Influência do material impregnado .....       | 99 |

|  |         |
|--|---------|
| 5.3. Ensaio com amostras com danos mecânicos induzidos .....   | 102     |
| <i>CAPÍTULO 6</i> .....  | 111     |
| 6. Equações de previsão da rigidez à tração .....              | 111     |
| 6.1. geotêxteis virgens confinados por madeira.....            | 112     |
| 6.1.1. Equação para o Geotêxtil GA (200g/m <sup>2</sup> )..... | 113     |
| 6.1.2. Geotêxtil GB (400g/m <sup>2</sup> ).....                | 116     |
| 6.2. Acurácia das equações de Previsão de Rigidez .....        | 119     |
| 6.2.1. Geotêxteis Virgens.....                                 | 119     |
| 6.2.2. Geotêxteis impregnados.....                             | 120     |
| 6.2.3. Geotêxteis com Danos Mecânicos.....                     | 121     |
| <br><i>CAPÍTULO 7</i> .....                                    | <br>123 |
| 7. Conclusões e Sugestões para pesquisas Futuras .....         | 123     |
| 7.1. Conclusões .....  | 123     |
| 7.2. Sugestões para Pesquisas Futuras .....                    | 127     |
| <br><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....                    | <br>129 |
| <br><i>APÊNDICES</i> .....                                     | <br>134 |
| A. Materiais utilizados no confinamento e Impregnação .....    | 134     |
| B. Curvas dos ensaios com geotêxteis virgens .....             | 135     |
| C. Funções Rigidez-deformação.....                             | 149     |

## ***LISTA DE TABELAS***

---

| <b>Tabela</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Tabela 3.1 – Características dos geotêxteis utilizados (Dados do fabricante).....                           | 45            |
| Tabela 3.2 - Condições em que cada tipo de geotêxtil foi ensaiado.....                                      | 45            |
| Tabela 3.3 – Interface de confinamento para cada tipo de ensaio. ....                                       | 47            |
| Tabela 3.4 – Características da Areia Leighton Buzzard 14/25 (Palmeira, 1987).....                          | 48            |
| Tabela 3.5 - Características da Areia Fina a Média do Rio Corumbá. ....                                     | 49            |
| Tabela 3.6 - Características da Areia CAESB. ....   | 51            |
| Tabela 3.7 - Características das microesferas de vidro usadas na impregnação.....                           | 53            |
| Tabela 3.8 - Características da Areia Fina usada na impregnação. ....                                       | 55            |
| <br>  |               |
| Tabela 5.1 – Ensaio com amostras virgens. ....  | 71            |
| Tabela 5.2 – Acréscimos de rigidez devido à tensão confinante com relação à rigidez não confinada (%). .... | 79            |
| Tabela 5.3 - Ensaio de amostras impregnadas. ....   | 91            |
| Tabela 5.4 – Porcentagem de vazios remanescentes de geotêxteis impregnados com EV.....                      | 98            |
| Tabela 5.5 - Ensaio de amostras com danos mecânicos induzidos. ....   | 103           |
| <br>  |               |
| Tabela 6.1 – Coeficientes A e B das equações para geotêxteis GA confinados em madeira. ....                 | 114           |
| Tabela 6.2 - Coeficientes A e B das equações para geotêxteis GB confinados em madeira. ....                 | 117           |

## ***LISTA DE FIGURAS***

---

| <b>Figura</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Figura 2.1 – Exemplos de aplicações de geotêxteis como reforço de solos (Jewell, 1996) .....  | 5             |
| Figura 2.2 - Alguns tipos de geotêxteis (Koerner, 1994).....  | 6             |
| Figura 2.3 – Alguns tipos de geogrelha (Aguiar e Vertematti, 2004).....   | 7             |
| Figura 2.4 - Curva de compatibilidade para determinação do equilíbrio do solo reforçado<br>(Modificado - Jewell, 1996).....                                 | 9             |
| Figura 2.5 - Seção tipo e detalhes construtivos do aterro reforçado com geotêxteis da SP-123<br>(Modificado - Carvalho et al., 1986).....                   | 12            |
| Figura 2.6 - Ensaio de tração em tira larga. ....   | 15            |
| Figura 2.7 – Parâmetros determinados a partir do ensaio de tração .....   | 16            |
| Figura 2.8 – Mecanismos de interação solo-reforço (Palmeira, 1999a). ....   | 17            |
| Figura 2.9 - Lay-out do equipamento de tração confinada desenvolvido por McGown et al.<br>(1982). (Bueno e Vilar, 2004). ....                               | 22            |
| Figura 2.10 – Alguns equipamentos de tração confinada (Modificado – Wu, 1991).....  | 23            |
| Figura 2.11 – Equipamentos de tração confinada desenvolvidos por Palmeira (1990 e 1998).<br>.....   | 25            |
| Figura 2.12 – Valores de rigidez obtidos pelas duas versões do equipamento desenvolvido por<br>Palmeira (1990 e 1998) (Martins, 2000a).....                 | 25            |
| Figura 2.13 - Curvas carga-alongamento de geotêxteis submetidos à tração confinada<br>(Wilson-Fahmy et al., 1993, citado por Koerner, 1994). ....           | 28            |
| Figura 2.14 - Seção transversal de geotêxteis submetidos a tensões confinantes diferentes. ....   | 31            |
| Figura 2.15 - Seção transversal de geotêxteis impregnados ( $\lambda = 8$ ) submetidos a tensões<br>confinantes diferentes (Gardoni e Palmeira, 2002). .... | 34            |
| <br>  |               |
| Figura 3.1- Desenho esquemático do equipamento com detalhe geométrico da amostra<br>geotêxtil (Martins, 2000a). ....  | 40            |
| Figura 3.2 – Vista em planta mostrando o posicionamento dos extensômetros e célula de carga<br>.....  | 40            |
| Figura 3.3 – Célula de tração confinada e conjunto de garras recartilhadas (Matheus, 2002). ....  | 41            |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.4 - Mecanismo de tração por meio de conjunto de cilindros hidráulicos – vista geral da interligação dos cilindros e bomba (Matheus, 2002)..... | 42 |
| Figura 3.5 – Detalhe da instrumentação do equipamento de tração confinada (Martins,2000a).<br>.....   | 43 |
| Figura 3.6 – Vista geral do equipamento montado (Matheus, 2002).....  | 44 |
| Figura 3.7 – Curva granulométrica da Areia Leighton Buzzard 14/25.....  | 48 |
| Figura 3.8 - Formato dos grãos da Areia Leighton Buzzard 14/25. ....  | 49 |
| Figura 3.9 - Curva granulométrica da Areia Fina a Média do Rio Corumbá. ....  | 50 |
| Figura 3.10 - Formato dos grãos da Areia Fina a Média do Rio Corumbá.....   | 50 |
| Figura 3.11 - Curva granulométrica da Areia CAESB. ....   | 51 |
| Figura 3.12 - Formato dos grãos da Areia CAESB. ....  | 51 |
| Figura 3.13 – Curva granulométrica das Microesferas de Vidro.....   | 53 |
| Figura 3.14 – Formato das Microesferas de Vidro de 0,044 a 0,088 mm. ....   | 54 |
| Figura 3.15 – Curva granulométrica da Areia Fina. ....  | 55 |
| Figura 3.16 – Formato dos grãos da Areia Fina do Rio Corumbá.....   | 55 |
| <br>  |    |
| Figura 4.1 - Tipos de danos mecânicos induzidos nos geotêxteis. ....  | 59 |
| Figura 4.2 – Seqüência de Preparação do ensaio.....   | 61 |
| Figura 4.3 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA virgens confinados por Madeira. ....  | 66 |
| Figura 4.4 – Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA virgens confinados por Areia Leighton Buzzard. ....   | 66 |
| Figura 4.5 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA virgens confinados por Areia da CAESB. ....   | 67 |
| Figura 4.6 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GA impregnados com microesferas de vidro ( $\lambda=4$ ) confinados por Madeira. ....              | 67 |
| Figura 4.7 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GB virgens confinados por Areia do Rio Corumbá. ....   | 68 |
| Figura 4.8 - Repetibilidade de ensaios de geotêxteis GC danificados (com danos do tipo RY12,5) confinados por Areia CAESB.....                          | 68 |
| <br>  |    |
| Figura 5.1 - Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em blocos de madeira. ....  | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.2 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em blocos de madeira.....  | 72 |
| Figura 5.3 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em blocos de madeira.....   | 73 |
| Figura 5.4 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em blocos de madeira..... | 73 |
| Figura 5.5 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em blocos de madeira.....   | 74 |
| Figura 5.6 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em blocos de madeira..... | 74 |
| Figura 5.7 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ARC.....                 | 76 |
| Figura 5.8 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ARC.....               | 76 |
| Figura 5.9 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ALB.....                 | 77 |
| Figura 5.10 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 100 kPa em ALB.....              | 77 |
| Figura 5.11 – Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GA confinado em madeira.                     | 80 |
| Figura 5.12 - Rigidez versus tensão confinante para geotêxtil GB confinado em madeira.....                   | 81 |
| Figura 5.13 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GA confinado em areia do Rio Corumbá.....    | 82 |
| Figura 5.14 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GB confinado em areia do Rio Corumbá.....    | 82 |
| Figura 5.15 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GA confinado em areia Leighton Buzzard.....  | 83 |
| Figura 5.16 - Rigidez versus tensão confinante para o geotêxtil GB confinado em areia Leighton Buzzard.....  | 84 |
| Figura 5.17 – Rigidez de Geotêxteis GA em diversas interfaces de confinamento – 50 kPa...                    | 86 |
| Figura 5.18 - Rigidez de Geotêxteis GA em diversas interfaces de confinamento – 100 kPa.                     | 86 |
| Figura 5.19 - Rigidez de Geotêxteis GA em diversas interfaces de confinamento – 150 kPa.                     | 87 |
| Figura 5.20 - Rigidez de Geotêxteis GB em diversas interfaces de confinamento – 50 kPa....                   | 88 |
| Figura 5.21 - Rigidez de Geotêxteis GB em diversas interfaces de confinamento – 100 kPa..                    | 88 |
| Figura 5.22 - Rigidez de Geotêxteis GB em diversas interfaces de confinamento – 150 kPa..                    | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.23 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 100 kPa.....   | 92  |
| Figura 5.24 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 100 kPa.....                                       | 92  |
| Figura 5.25 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 150 kPa.....   | 93  |
| Figura 5.26 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados confinados a 150 kPa.....                                       | 93  |
| Figura 5.27 - Influência do confinamento e da impregnação na compressibilidade de geotêxteis não-tecidos (Palmeira et al., 2005)..... | 94  |
| Figura 5.28 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 100 kPa.....   | 95  |
| Figura 5.29 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 100 kPa.....                                       | 95  |
| Figura 5.30 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 150 kPa.....   | 96  |
| Figura 5.31 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB impregnados confinados a 150 kPa.....                                       | 96  |
| Figura 5.32 – Variação de $p$ com $\lambda$ (Palmeira et al., 2005).....  | 98  |
| Figura 5.33 – Variação de $J$ com $d$ para geotêxteis impregnados com EV.....   | 99  |
| Figura 5.34 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA impregnados com EV e AF.....  | 100 |
| Figura 5.35 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA impregnados com EV e AF.....  | 100 |
| Figura 5.36 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GB impregnados com EV e AF.....  | 101 |
| Figura 5.37 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GB impregnados com EV e AF.....  | 101 |
| Figura 5.38 – Curvas carga-deformação de geotêxteis GA danificados.....   | 104 |
| Figura 5.39 – Curvas rigidez-deformação de Geotêxteis GA danificados.....   | 104 |
| Figura 5.40 – Propagação do dano RH50 no ensaio de tração confinada.....  | 106 |
| Figura 5.41 - Propagação do dano RY25 no ensaio de tração confinada.....  | 106 |
| Figura 5.42 – Curvas carga-deformação de Geotêxteis GC danificados.....   | 107 |
| Figura 5.43 – Curvas rigidez-deformação de Geotêxteis GC danificados.....   | 107 |
| Figura 5.44 – Curvas carga-deformação de geotêxteis com danos do tipo RH.....   | 109 |
| Figura 5.45 - Curvas rigidez-deformação de geotêxteis com danos do tipo RH.....   | 109 |
| Figura 5.46 – Curvas carga-deformação de geotêxteis com danos do tipo RY.....   | 110 |
| Figura 5.47 - Curvas rigidez-deformação de geotêxteis com danos do tipo RY.....   | 110 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.1 – Funções rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados por blocos de madeira.<br>.....  | 113 |
| Figura 6.2 – Coeficiente A em função da tensão confinante para geotêxtil GA. ....  | 115 |
| Figura 6.3 - Coeficiente B em função da tensão confinante para geotêxtil GA. ....  | 115 |
| Figura 6.4 - Funções rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados por blocos de madeira.<br>.....  | 116 |
| Figura 6.5 - Coeficiente A em função da tensão confinante para geotêxtil GB. ....  | 117 |
| Figura 6.6 - Coeficiente B em função da tensão confinante para geotêxtil GB.....   | 118 |
| Figura 6.7 – Relação entre valores de rigidez previstos e medidos em ensaios com geotêxteis<br>GA e GB virgens. ....   | 119 |
| Figura 6.8 - Relação entre valores de rigidez previstos e medidos em ensaios com geotêxteis<br>GA e GB impregnados com microesferas de vidro e areia fina..... | 120 |
| Figura 6.9 - Relação entre valores de rigidez previstos e medidos em ensaios com geotêxteis<br>GA com danos mecânicos. ....                                    | 122 |
|  |     |
| Figura A.1 – Curvas granulométricas dos materiais usados no confinamento .....   | 134 |
| Figura A.2 - Curvas granulométricas dos materiais usados para impregnação.....   | 134 |
| Figura B.1 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em<br>ARC.....   | 135 |
| Figura B.2 - Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em<br>ARC.....   | 135 |
| Figura B.3 – Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em<br>ARC.....  | 136 |
| Figura B.4 – Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em<br>ARC.....  | 136 |
| Figura B.5 - Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 25 kPa em ALB.<br>.....   | 137 |
| Figura B.6 - Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 25 kPa em<br>ALB.....   | 137 |
| Figura B.7 - Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em ALB.<br>.....   | 138 |
| Figura B.8 - Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 50 kPa em<br>ALB.....   | 138 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura B.9 - Curvas carga-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em ALB. ....    | 139 |
| Figura B.10 - Curvas rigidez-deformação dos geotêxteis GA e GB confinados a 150 kPa em ALB. .... | 139 |
| Figura B.11 – Curva carga-deformação de geotêxteis GA confinados em Madeira. ....                | 140 |
| Figura B.12 - Curva rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados em Madeira. ....              | 140 |
| Figura B.13 – Curva carga-deformação de geotêxteis GB confinados em Madeira. ....                | 141 |
| Figura B.14 - Curva rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados em Madeira. ....              | 141 |
| Figura B.15 – Rigidez-deformação (menores que 5%) - GA confinados em Madeira. ....               | 142 |
| Figura B.16 - Rigidez-deformação (menores que 5%) - GB confinados em Madeira. ....               | 142 |
| Figura B.17 – Curva carga-deformação de geotêxteis GA confinados em ARC. ....                    | 143 |
| Figura B.18 - Curva rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados em ARC. ....                  | 143 |
| Figura B.19 - Curva carga-deformação de geotêxteis GB confinados em ARC. ....                    | 144 |
| Figura B.20 - Curva rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados em ARC. ....                  | 144 |
| Figura B.21 – Rigidez-deformação (menores que 5%) - GA confinados em ARC. ....                   | 145 |
| Figura B.22 – Rigidez-deformação (menores que 5%) - GB confinados em ARC. ....                   | 145 |
| Figura B.23 - Curva carga-deformação de geotêxteis GA confinados em ALB. ....                    | 146 |
| Figura B.24 - Curva rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados em ALB. ....                  | 146 |
| Figura B.25 - Curva carga-deformação de geotêxteis GB confinados em ALB. ....                    | 147 |
| Figura B.26 - Curva rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados em ALB. ....                  | 147 |
| Figura B.27 - Rigidez-deformação (menores que 5%) - GA confinados em ALB. ....                   | 148 |
| Figura B.28 - Rigidez-deformação (menores que 5%) - GB confinados em ALB. ....                   | 148 |
| Figura C.1 - Funções rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados em ARC. ....                 | 149 |
| Figura C.2 - Funções rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados em ARC. ....                 | 150 |
| Figura C.3 - Funções rigidez-deformação de geotêxteis GA confinados em ALB. ....                 | 151 |
| Figura C.4 – Funções rigidez-deformação de geotêxteis GB confinados em ALB. ....                 | 152 |

## ***LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES***

---

|                       |   |
|-----------------------|---|
| a                     | Adesão solo-geossintético   |
| A                     | Área da amostra geotêxtil   |
| ABNT                  | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| A.CAESB               | Areia grossa de filtro da CAESB   |
| AF                    | Areia fina do Rio Corumbá com granulometria variando de 0,044 a 0,088 mm        |
| AFNOR                 | Association Française de Normalization  |
| ALB                   | Areia Leighton Buzzard 14/25  |
| ARC                   | Areia fina a média do Rio Corumbá, fração passante na peneira #40               |
| ASTM                  | American Society for Testing Material   |
| b                     | Altura ou espessura dos membros de ancoragem da geogrelha                       |
| B                     | Largura da amostra geotêxtil  |
| c                     | Coesão do solo  |
| CAESB                 | Companhia de Águas e Esgoto de Brasília   |
| d                     | Porcentagem remanescente de vazios da manta geotêxtil                           |
| DI                    | Grau de interferência (Palmeira, 1987)  |
| EV                    | Microesferas de vidro com diâmetros variando de 0,044 a 0,088 mm                |
| $f$                   | Coefficiente de interação por atrito  |
| $f_b$                 | Coefficiente de aderência por ancoragem   |
| $f_{ds}$              | Coefficiente de aderência ao deslizamento sobre o plano da geogrelha            |
| F                     | Força total de tração na amostra de geotêxtil                                   |
| GA                    | Geotêxtil não tecido agulhado filamentos contínuos de poliéster A – Bidim OP 20 |
| GB                    | Geotêxtil não tecido agulhado filamentos contínuos de poliéster B – Bidim OP 40 |
| GC                    | Geotêxtil não tecido agulhado filamentos contínuos de poliéster C – Bidim OP 60 |
| $J_i$                 | Rigidez à tração inicial  |
| $J_{max}$             | Rigidez à tração máxima   |
| $J_{sec GA}$          | Rigidez à tração secante para uma deformação de 2% no geotêxtil tipo GA         |
| $J_{sec GB}$          | Rigidez à tração secante para uma deformação de 2% no geotêxtil tipo GB         |
| $J_t$                 | Rigidez à tração tangente   |
| $J_{sec \varepsilon}$ | Rigidez à tração secante para uma deformação igual a $\varepsilon$              |
| $l_{f(i)}$            | Leitura final do extensômetro $i$   |

|               |  |
|---------------|--|
| $l_{o(i)}$    | Leitura inicial do extensômetro $i$  |
| $L_i$         | Comprimento inicial da área útil da amostra  |
| $M_2$         | Massa da amostra de geotêxtil resinada e perfurada   |
| $M_3$         | Massa da amostra de geotêxtil resinada, perfurada e impregnada.  |
| Mad           | Blocos de madeira  |
| $M_f$         | Massa dos filamentos que compõem a amostra geotêxtil   |
| $M_s$         | Massa de solo impregnada no geotêxtil  |
| $n$           | Porosidade do geotêxtil  |
| NBR           | Norma Brasileira   |
| $p$           | Fração do volume de vazios do geotêxtil ocupada por grãos de solo  |
| RH10          | Dano do tipo Rasgo Horizontal de 10 mm   |
| RH25          | Dano do tipo Rasgo Horizontal de 25 mm   |
| RH50          | Dano do tipo Rasgo Horizontal de 50 mm   |
| RY12,5        | Dano do tipo Rasgo em “Y” de 12,5 mm   |
| RY25          | Dano do tipo Rasgo em “Y” de 50 mm   |
| S             | Espaçamento entre os membros de ancoragem da geogrelha   |
| $t_{GT}$      | Espessura do geotêxtil   |
| T             | Carga de tração por unidade de comprimento   |
| $T_{max}$     | Carga máxima de tração por unidade de comprimento suportada pelo geossintético                                 |
| $\alpha_b$    | Fração da área do membro transversal da geogrelha disponível para a mobilização de resistência passiva do solo |
| $\alpha_s$    | Porcentagem da parcela sólida em planta da geogrelha, disponível para o atrito de pele com o solo.             |
| $\delta$      | Ângulo de atrito de interface solo-geossintético   |
| $\delta'$     | Ângulo de atrito de interface entre o material constituinte da geogrelha e o solo                              |
| $\Delta L$    | Deslocamento médio da amostra  |
| $\Delta l_1$  | Deslocamento da garra móvel na extremidade do extensômetro 1   |
| $\Delta l_2$  | Deslocamento da garra móvel na extremidade do extensômetro 2   |
| $\Delta l_3$  | Deslocamento da garra fixa na extremidade do extensômetro 3  |
| $\Delta l_4$  | Deslocamento da garra fixa na extremidade do extensômetro 4  |
| $\Delta L_i$  | Deslocamento medido no extensômetro $i$  |
| $\varepsilon$ | Deformação   |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\varepsilon_{\max}$ | Deformação máxima à tração  |
| $\phi$               | Ângulo de atrito do solo  |
| $\lambda$            | Coefficiente de interação por adesão  |
| $\lambda$            | Grau de impregnação   |
| $\mu$                | Gramatura do geotêxtil  |
| $\rho_s$             | Massa específica dos grãos de solo  |
| $\sigma$             | Tensão confinante   |
| $\sigma_b$           | Máxima resistência passiva para membros transversais de geogrelhas testados ao arrancamento em isolamento |
| $\sigma_y$           | Pressão normal no plano de instalação da geogrelha  |

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. MOTIVAÇÃO DA PESQUISA**

A técnica de reforço de solos com geossintéticos consiste na combinação de dois materiais com propriedades distintas e funções complementares: o solo que possui elevada resistência à compressão e o geossintético que geralmente apresenta elevada resistência à tração, melhorando a resistência e reduzindo as deformações da estrutura (Gomes, 1993a e Palmeira, 1999a). A mobilização de esforços de tração no geossintético, depende da deformação requerida para mobilizar estes esforços que, por sua vez, depende da rigidez à tração do reforço. Por isso, reforços com rigidezes diferentes produzem deformações diferentes no maciço mesmo quando apresentam a mesma resistência à tração.

Para minimizar os deslocamentos em estruturas de solos reforçados, portanto, é preferível a utilização de reforços mais rígidos. No entanto, estruturas de solo reforçado com geotêxteis, reforços considerados extensíveis, têm apresentado deformações menores que as previstas visto que a maioria das previsões são feitas considerando-se os valores de rigidez determinados por meio de ensaios de tração em isolamento. Várias pesquisas comprovaram que o confinamento do geotêxtil (especialmente os não tecidos agulhados) promove um aumento na sua rigidez à tração, reduzindo a deformação necessária para a mobilização de esforços de tração nestes materiais.

Uma vez que o confinamento diminui a deformabilidade de geotêxteis não tecidos, os valores de rigidez obtidos por meio de ensaios de tração confinada promovem a melhoria dos parâmetros de projeto, ampliando as possibilidades de utilização de geotêxteis não tecidos em aplicações de reforço e reduzindo os custos das obras de solo reforçado já que são materiais geralmente mais baratos do que os reforços mais rígidos.

Neste contexto, torna-se importante o estudo dos efeitos do confinamento nos valores de rigidez à tração de geotêxteis não tecidos, identificando-se, inclusive, outros fatores capazes influenciar o comportamento mecânico dos geotêxteis submetidos a solicitações de tração sob confinamento.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é estudar o comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos sob confinamento por meio da utilização de equipamento de ensaios de tração confinada desenvolvido na Universidade de Brasília, com o intuito de prever valores de rigidez mais realistas do reforço geotêxtil sob diversas situações de confinamento, estudando os fatores mais relevantes no incremento de rigidez à tração de geotêxteis não tecidos. Desta forma, busca-se verificar o efeito dos seguintes fatores na rigidez de geotêxteis confinados:

- Influência da gramatura do geotêxtil;
- Influência da tensão confinante;
- Influência do material confinante;
- Influência do grau de impregnação;
- Influência do material de impregnação;
- Influência de danos mecânicos.

O segundo objetivo da dissertação é sugerir procedimentos de previsão da rigidez à tração de geotêxteis não tecidos em função dos principais fatores que a influenciam, como a tensão confinante.

Objetivos secundários estão listados abaixo:

- Verificação da repetibilidade do equipamento;
- Proposição de um método para a padronização de ensaios de tração confinada;

## 1.3. METODOLOGIA

O comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos foi estudado por meio de ensaios de tração confinada, com os quais foram determinadas as curvas carga-deformação e rigidez-deformação das amostras ensaiadas. Com as curvas obtidas foram feitas comparações entre os resultados verificando-se a influência de diversos parâmetros como a tensão confinante, gramatura do geotêxtil, material de interface, danos mecânicos, grau de impregnação e forma do material impregnado na manta.

Nos ensaios com geotêxteis virgens, variaram-se os materiais confinantes, as tensões de confinamento e a gramatura do geotêxtil, permitindo a verificação da influência destes parâmetros nos valores de rigidez de geotêxteis submetidos a solicitações de tração sob

confinamento. O programa de ensaios com amostras virgens abrange 20 ensaios de tração confinada utilizando geotêxteis com duas gramaturas diferentes, quatro tensões confinantes e três interfaces de confinamento.

A verificação da influência da impregnação no comportamento carga-alongamento de geotêxteis não tecidos foi feita por meio de ensaios com amostras de geotêxteis com duas gramaturas diferentes, impregnadas por dois materiais com curvas granulométricas semelhantes e formatos dos grãos diferentes, dois graus de impregnação e submetidas a duas tensões confinantes, num total de 17 ensaios, todos utilizando um mesmo material confinante.

O estudo do efeito dos danos mecânicos em amostras de geotêxteis não tecidos abrangeu 11 ensaios variando-se a gramatura do geotêxtil e o tipo e dimensão do dano, todos confinados em um mesmo material sob a mesma tensão confinante. Apenas um destes ensaios foi feito com uma tensão menor com o intuito de ressaltar a importância da tensão confinante no comportamento carga-alongamento deste tipo de reforço, mesmo quando danificado. Foram selecionadas duas gramaturas diferentes, dois tipos de dano e quatro dimensões de dano diferentes.

Com as curvas *carga de tração* versus deformação obtidas por meio dos ensaios de tração confinada foi possível determinar as curvas de *rigidez secante* versus deformação dos geotêxteis. Para determinar os percentuais de o acréscimo ou decréscimo de rigidez devido aos fatores relevantes no comportamento carga-alongamento dos geotêxteis não tecidos, estabeleceu-se a utilização dos valores de rigidez secante a 2% de deformação.

Por meio das curvas rigidez versus deformação para diferentes tensões de confinamento dos geotêxteis virgens foi possível propor equações de previsão da rigidez dos geotêxteis confinados, em função da tensão confinante e da deformação do geotêxtil.

#### **1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente Capítulo apresenta uma *introdução* do tema englobando a motivação da pesquisa, seus objetivos, a metodologia usada para atingir estes objetivos e um resumo dos assuntos de cada capítulo.

No Capítulo 2 é feita uma *revisão bibliográfica* acerca da aplicação de geotêxteis em reforço de solos, propriedades requeridas para o uso destes materiais, que garantam um comportamento adequado deste tipo de obra e casos históricos de estruturas de solos reforçados com geotêxteis. Este capítulo aborda, também, os ensaios utilizados na



determinação de parâmetros importantes em projetos de solos reforçados e, finalmente, discute os fatores que influenciam a rigidez à tração de geotêxteis confinados.

No Capítulo 3, é feita a descrição do *equipamento* de tração confinada usado na pesquisa, discutindo-se as inovações que ele apresenta em relação a uma versão anterior deste mesmo equipamento. Cada elemento do equipamento (célula de tração confinada, sistema de garras, bolsa de borracha, sistema de tração e instrumentação) é descrito de forma a facilitar o entendimento da preparação e execução do ensaio. Neste capítulo estão descritas, também, as propriedades e características relevantes dos *materiais* utilizados nos ensaios: geotêxteis e materiais confinantes, além dos materiais usados na impregnação de amostras geotêxteis.

A *metodologia* da pesquisa é apresentada no Capítulo 4, descrevendo passo a passo, a preparação das amostras de geotêxtil, a preparação e execução do ensaio de tração confinada e o procedimento de determinação das curvas relevantes dos ensaios (carga-deformação e rigidez-deformação). No final deste capítulo é apresentada a repetibilidade de alguns ensaios utilizando o equipamento e os materiais da pesquisa, preparados segundo a metodologia adotada.

No Capítulo 5 estão apresentados os *resultados* e as *análises* dos ensaios de tração confinada feitos durante o programa experimental. O capítulo é subdividido em três partes, correspondentes às condições dos geotêxteis ensaiados: virgens, impregnados e danificados mecanicamente. Em cada parte são abordados os fatores que influenciam os valores de rigidez à tração dos geotêxteis confinados, apresentando-se percentuais de acréscimo ou decréscimo de rigidez à tração devido aos efeitos daqueles fatores no comportamento mecânico dos geotêxteis não tecidos.

No Capítulo 6 é feita a determinação das curvas que melhor se ajustam aos pontos da rigidez secante em função da deformação, cujas funções foram úteis para propor *equações de previsão da rigidez* à tração de geotêxteis não tecidos em função da tensão confinante e da deformação da manta. No final deste capítulo é feita a comparação entre os valores de rigidez previstos pelas equações propostas e os valores de rigidez medidos nos ensaios de tração confinada.

O Capítulo 7 apresenta as principais *conclusões* da pesquisa, recomendações baseadas nestas conclusões e *sugestões* para pesquisas futuras, relacionadas ao tema estudado.

As referências bibliográficas da pesquisa estão apresentadas logo após o Capítulo 7. Em seguida, figuras adicionais para o entendimento dos resultados obtidos na pesquisa estão apresentadas nos Apêndices.