



Vinícius Roberto de Aguiar

**RESISTÊNCIA DE INTERFACES
SOLO-GEOSSINTÉTICO -
DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO E ENSAIOS**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil

Orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Co-orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro, 25 de Fevereiro de 2008.



Vinícius Roberto de Aguiar

**Resistência de Interfaces Solo-Geossintético
- Desenvolvimento de Equipamento e Ensaio**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Co-orientador
COPPE/UFRJ

Prof. Ennio Marques Palmeira

UnB

Prof^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

UERJ

Prof. Maurício Ehrlich

COPPE/UFRJ

Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Fevereiro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Vinícius Roberto de Aguiar

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS em 2000. Realizou estágio de pesquisa no Laboratório de Mecânica dos Solos - LMS auxiliando em projetos de pesquisa de geotecnia, em 1997/2000. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) naquela universidade, em 2001. Desenvolveu pesquisa de laboratório sobre o desenvolvimento e calibração de um equipamento de ensaio de rampa para a obtenção de parâmetros de interface solo-geossintético. Publicou artigos técnicos sobre o assunto em congressos nacionais. Ingressou no curso de doutorado em Engenharia Civil da PUC-Rio em 2003. É Engenheiro Civil da Engevix Engenharia S.A.

Ficha Catalográfica

Aguiar, Vinícius Roberto de

Resistência de Interfaces Solo-Geossintético - Desenvolvimento de Equipamento e Ensaios / Vinícius Roberto de Aguiar; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2007.

373 f.; 30 cm

1. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Geossintéticos. 3. Equipamentos de Laboratório. 4. Interação Solo-geossintético. 5. Parâmetros de Interface. I. Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. II. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Faustino e Tereza, minha irmã Viviane e Luciana, pelos exemplos, pelo apoio incondicional e incentivo, dedico este trabalho.

Agradecimentos

Ao Professor Alberto Sayão, pela atenção, amizade, confiança depositada e oportunidade.

A professora Anna Laura Nunes, pelo estímulo, conselhos, companheirismo, confiança depositada e principalmente pela amizade.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia e meio Ambiente da PUC-Rio, em especial ao Engenheiro Willian e Amaury por estarem sempre dispostos a ajudar e a ensinar.

Aos funcionários do Laboratório Estrutura Euclides, José Nilson, Evandro e Aroldo, com quem convivi de forma mais direta durante toda a realização do meu trabalho e que sempre estiveram dispostos a me ajudar e pela grande amizade.

Aos funcionários do departamento Ana Roxo, Rita de Cássia e Cristiano que nunca mediram esforços para resolver as pendengas administrativas e pelo profissionalismo.

Aos colegas da PUC-Rio de forma geral, pela ajuda, motivação e os vários momentos de descontração. Em especial: Bernadete Lopes (Bê), Ana Carolina Campos, Alessandra Tavares de Castro e Marcelo Miqueletto.

Um agradecimento especial a Taíse Carvalho, Elisângela Oliveira, Suelen Rodrigues, Emiliana Guedes, Andrea Cynthia dos Santos, Algemiro Augusto Neto pela convivência. São pessoas com quem convivi nos últimos anos e a quem tenho um carinho especial.

A Luciana Correia Laurindo Martins Vieira, um agradecimento muito mais que especial pela cumplicidade, convivência, companheirismo e dedicação. É uma pessoa pela qual sinto muito carinho e que poderá contar sempre comigo esteja onde estiver.

A Huesker Ltda. pelo apoio financeiro e pela confiança depositada.

Ao CNPq pela bolsa de doutorado.

Resumo

Aguiar, Vinícius Roberto de; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. **Resistência de Interfaces Solo-Geossintético - Desenvolvimento de Equipamento e Ensaios**. Rio de Janeiro, 2007. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A demanda por melhores técnicas de dimensionamento incentivou o desenvolvimento de estudos capazes de fornecer uma maior compreensão do comportamento dos geossintéticos quando inseridos na massa de solo. A interação solo-geossintético é complexa, sendo função das propriedades dos materiais utilizados, solo e geossintético, e expressa por meio dos parâmetros de adesão e ângulo de atrito de interface. O estudo da interação solo-geossintético pode ser realizado empregando-se ensaios de campo ou laboratório. Os ensaios de campo são considerados os mais representativos, pois simulam mais corretamente as condições e as solicitações *in situ*. Entretanto, são ensaios de custos elevados e de difícil execução. Apesar de alguns inconvenientes tais como o tamanho reduzido de amostra, os ensaios de laboratório têm custos mais acessíveis e são executados com maior facilidade. Os ensaios normalmente utilizados são os de arrancamento, cisalhamento (convencional, inclinado e com reforço inclinado) e rampa. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um novo equipamento capaz de executar três tipos de ensaios de ensaio de cisalhamento (convencional, inclinado e rampa), combinando-se diferentes caixas de ensaio e acessórios. Além do projeto e construção, o trabalho também apresenta os resultados de uma série ensaios de cisalhamento empregando-se um solo (areia) e três geossintéticos (uma geogrelha e duas geomembranas). Estes resultados permitiram a avaliação da acurácia do equipamento, estudo das condições de contorno e análise comparativa dos parâmetros de interface obtidos através dos três tipos de ensaio.

Palavras Chave

Geossintéticos, Interação Solo-Geossintético, Parâmetros de Interface, Ensaios de Laboratório.

Abstract

Aguiar, Vinícius Roberto de; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim; Lopes, Anna Laura Lopes da Silva. **Resistance of Interfaces Soil-geosynthetics - Development of Equipment and Tests**. Rio de Janeiro, 2007. DSC. Thesis - Departamento of Civil Engineering, Catholic University of Rio de Janeiro.

The demand for better techniques of sizing motivated the development of studies capable to supply a larger understanding of the behavior of the geosynthetics when inserted in the soil mass. The interaction soil-geosynthetics it is complex, being function of the properties of the used materials, soil and geossintético, and expresses through the adhesion and angle of interface attrition. The study of the interaction soil-geosynthetics it can be accomplished through field test or laboratory. The field test are considered the most representative, because they simulate the conditions and the solicitations in situ more correctly. However, they are tests of high costs and of difficult execution. In spite of some such inconveniences as the sample size, the laboratory test have more accessible costs and they are executed with larger easiness. The tests usually used they are the one of pullout and direct shear (conventional, with tilted reinforcement, tilted and ramp). This work presents the development of a new equipment capable to execute three types of direct shear test (conventional, tilted and ramp), combining different test boxes and accessories. Besides the project and construction the work also presents the results of a series direct shear test being used une soil types (sand) and tree geosynthetics (one geogrids and two geomembranes), executed in the developed equipment. These results allowed the evaluation of the performance of the equipment, study of the contour conditions and comparative analysis of the interface parameters obtained through the three test types.

Keywords

Geosynthetics, Soil-Geosynthetics Interaction, Laboratory Tests.

Sumário

1 . Introdução	36
1.1. Motivação	36
1.2. Objetivos	38
1.3. Escopo da Tese	39
2 . Resistência da Interface Solo-Geossintético	40
2.1. Considerações Iniciais	40
2.2. Utilização de Geossintéticos	41
2.3. Mobilização da Resistência da Interface Solo-Geossintético	46
2.3.1. Atrito na Interface Solo-Reforço	46
2.3.2. Tração no Reforço	47
2.3.3. Arrancamento do Reforço	48
2.4. Avaliação da Resistência da Interface Solo-Geossintético	48
2.5. Ensaio Solo-Geossintético	50
2.5.1. Ensaio de Arrancamento	51
2.5.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	55
2.5.3. Ensaio de Cisalhamento Direto com o Reforço Inclinado	56
2.5.4. Ensaio de Rampa	58
2.5.5. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	59
2.6. Considerações Finais	60
3 . Ensaio para Avaliação da Resistência da Interface	62
3.1. Considerações Iniciais	62
3.2. Ensaio de Rampa	62
3.2.1. Métodos para ensaio de Rampa	64
3.2.2. Equipamentos de ensaio de Rampa	65
3.2.3. Fatores de influência dos ensaios de rampa associados ao equipamento	73
3.2.4. Fatores de influência dos ensaios de Rampa associados aos materiais	79

3.3. Ensaio de Cisalhamento Direto	87
3.3.1. Métodos para ensaio de Cisalhamento Direto	89
3.3.2. Equipamentos de ensaio de Cisalhamento Direto	90
3.3.3. Fatores de influência dos ensaios de Cisalhamento Direto associados ao equipamento	99
3.3.4. Fatores que influenciam os ensaios de Cisalhamento Direto associados aos materiais	110
3.4. Considerações Finais	116
4 . Desenvolvimento do Equipamento	120
4.1. Considerações Iniciais	120
4.2. Estrutura Principal	120
4.3. Componentes do Equipamento	124
4.3.1. Caixas de Ensaio e Garras	125
4.3.2. Sistema de Basculamento	134
4.3.3. Sistema de Aplicação de Força Normal	134
4.3.4. Sistema de Aplicação de Força Cisalhante	140
4.3.5. Instrumentação	143
4.4. Configurações de Ensaio	145
4.4.1. Ensaio de Rampa	146
4.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	151
4.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	155
4.4.4. Ensaio de Arrancamento	161
4.5. Testes Preliminares	164
4.6. Limitações de Uso	166
4.7. Considerações Finais	172
5 . Programa Experimental	173
5.1. Considerações Iniciais	173
5.2. Materiais da Pesquisa	174
5.2.1. Solo	174
5.2.2. Geossintéticos	175
5.3. Preparação dos Corpos de Prova	177
5.4. Procedimento de Ensaio	185

5.4.1. Ensaio de Rampa	185
5.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	186
5.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	188
5.5. Metodologias de Análises de Resultados	190
5.5.1. Ensaio de Rampa	190
5.5.2. Cisalhamento Direto Convencional e Inclinado	191
5.6. Programa de Ensaio	192
5.6.1. Ensaio da Tese	193
5.6.2. Ensaio Pré-existent	197
5.7. Considerações Finais	197
6 . Resultados e Análises: Verificações Iniciais	199
6.1. Considerações Iniciais	199
6.2. Critério de Ruptura Unificado	200
6.3. Precisão do Equipamento	204
6.4. Influência das Dimensões das Caixas de Ensaio	210
6.4.1. Variação da Espessura de Solo no Interior das Caixas de Ensaio	211
6.4.2. Variação da Área de Contato	220
6.5. Influência da Metodologia de Ensaio	228
6.6. Desgaste e Dano na Geomembrana	232
6.7. Considerações Finais	236
7 . Resultados e Análises: Ensaio de Rampa	238
7.1. Considerações Iniciais	238
7.2. Influência da Tensão Confinante	239
7.3. Influência da Densidade Relativa	240
7.3.1. Interface Solo-Solo	240
7.3.2. Interface Solo-Geogrelha	243
7.3.3. Interface Solo-Geomembrana	245
7.3.4. Eficiências de Interfaces	250
7.4. Influência do Tipo de Solo	253
7.4.1. Interface Solo-Solo	253
7.4.2. Interface Solo-Geogrelha	255
7.4.3. Interface Solo-Geomembrana	258

7.4.4. Eficiências de Interface	260
7.5. Influência do Tipo de Geossintético	261
7.6. Considerações Finais	262
8 . Resultados e Análises: Ensaios de Cisalhamento Direto Convencional	264
8.1. Considerações Iniciais	264
8.2. Influência da Tensão Confinante	264
8.3. Influência do Tipo de Solo	265
8.3.1. Interface Solo-Solo	265
8.3.2. Interface Solo-Geogrelha	267
8.3.3. Interface Solo-Geomembrana	270
8.3.4. Eficiências de Interfaces	272
8.4. Influência do Tipo de Geossintético	273
8.5. Considerações Finais	274
9 . Resultados e Análises: Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	276
9.1. Considerações Iniciais	276
9.2. Influência da Tensão Confinante	277
9.3. Influência do Tipo de Solo	278
9.3.1. Interface Solo-Solo	278
9.3.2. Interface Solo-Geogrelha	283
9.3.3. Interface Solo-Geomembrana	286
9.3.4. Eficiências de Interfaces	290
9.4. Influência do Tipo de Geossintético	294
9.5. Considerações Finais	296
10 . Resultados e Análises: Comparação dos Diferentes Ensaios	297
10.1. Considerações Iniciais	297
10.2. Influência do Tipo de Ensaio	298
10.3. Considerações Finais	306
11 . Conclusões e Sugestões	308
11.1. Conclusões	308

11.2. Sugestões para Futuras Pesquisas	312
Referências Bibliográficas	313
Apêndice I. Configurações de Ensaio de Rampa	320
Apêndice II. Configurações de Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	331
Apêndice III. Configurações de Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	338
Apêndice IV. Configurações de Ensaio de Arrancamento	347
Apêndice V. Limitações de Uso	350
Apêndice VI. Aguiar (2003)	353
Apêndice VII. Rezende (2005)	358
Apêndice VIII. Tavares (2008)	362
Apêndice IX. Análise de Distribuição de Tensões	366
Anexo I. Critérios de Ruptura	371

Lista de Figuras

Figura 1 - Modos de interação e movimentos relativos solo-geossintético em um muro de solo reforçado (Palmeira, 1987).	37
Figura 2 - Sistema de cobertura multicamadas (Melo <i>et al.</i> 2003).	38
Figura 3 - Ziggurates.	40
Figura 4 - Consumo de geossintéticos em milhões de metros quadrados por ano na América do Norte (Koerner, 2000).	42
Figura 5 - Valor aproximado, em milhões de dólares, do consumo de geossintéticos na América do Norte (Koerner, 2000).	42
Figura 6 - Exemplos de utilização de geossintéticos como reforçado.	44
Figura 7 - Encontro de pontes.	45
Figura 8 - Exemplos de utilização de geossintéticos como material de impermeabilização.	45
Figura 9 - Esquema de um sistema de cobertura e impermeabilização de um aterro de resíduos sólidos.	46
Figura 10 - Modos de interação e movimentos relativos solo-geossintético.	47
Figura 11 - Ponto de atuação de $T_{m\acute{a}x}$. para muros reforçados (Christopher <i>et al.</i> , 1990).	48
Figura 12 - Obtenção de parâmetros de resistência de interface. (a) curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e (b) envoltória de resistência.	49
Figura 13 - Ensaios para geossintéticos (Sayão, 2004).	50
Figura 14 - Esquema de um ensaio de arrancamento.	51
Figura 15 - Equipamento para ensaios de arrancamento do CEDEX-Madri (Castro, 1999).	52
Figura 16 - Influência da manga nos ensaios de arrancamento (Lopes e Ladeira, 1996).	54
Figura 17 - Esquema de um ensaio de cisalhamento direto.	55
Figura 18 - Preparação de um ensaio de cisalhamento direto para uma interface solo-geogrelha (Sieira, 2003).	56
Figura 19 - Esquema de um ensaio de cisalhamento com reforço inclinado.	56
Figura 20 - Preparação de um ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado para uma interface solo-geogrelha (Sieira, 2003).	57

Figura 21 - Esquema de um ensaio de rampa.....	59
Figura 22 - Esquema de um ensaio de cisalhamento direto inclinado.....	59
Figura 23 - Equipamento de cisalhamento direto adaptado ao ensaio de rampa (Mello, 2001).....	60
Figura 24 - Mecânica do ensaio de rampa (Melo <i>et al.</i> , 2003).....	63
Figura 25 - Representação esquemática do equipamento de ensaio de rampa (Adaptado da ISO 12957-2).	65
Figura 26 - Equipamento de rampa reportado por Girard <i>et al.</i> (1990).....	66
Figura 27 - Equipamento de rampa reportado por Gourc <i>et al.</i> (1996).	66
Figura 28 - Equipamento de rampa reportado por Izgin e Wasti (1998).....	67
Figura 29 - Equipamento de rampa reportado por Lalarakotoson <i>et al.</i> (1999). ...	68
Figura 30 - Equipamento da Universidade de Brasília (Lima Jr., 2000).....	69
Figura 31 - Equipamento da Universidade do Porto (Lopes, 2001).....	69
Figura 32 - Equipamento reportado por Briançon <i>et al</i> (2002).	70
Figura 33 - Equipamento de rampa reportado por Najero (2003).	71
Figura 34 - Equipamento de rampa da PUC-Rio (Aguiar, 2003).....	72
Figura 35 - Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado (Melo <i>et al.</i> , 2003).	74
Figura 36 - Envoltórias de resistência dos ensaios de rampa para interfaces areia- geomembranas para uma área de contato de 60x60mm (Izgin e Wasti, 1998).	76
Figura 37 - Variação do ângulo de atrito de interface em função da variação da área de contato (Izgin e Wasti, 1998).	76
Figura 38 - Influência da presença de base rígida (1) e base solo (2) no ensaio de rampa com geogrelhas: (a) uniaxial e (b) biaxial (Lopes, 2001).....	77
Figura 39 - Contribuição do atrito solo-solo (setas pretas) e atrito solo-geogrelha (setas brancas).....	78
Figura 40 - Influência da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de interface (Wasti e Özduzgun, 2001).	79
Figura 41 - Comparação entre as envoltórias de ruptura de diversas interfaces (Mello, 2001).....	82
Figura 42 - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido, (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).	85

Figura 43 - Envoltórias de ruptura e variação dos deslocamentos para os dois tipos de solo e os geossintéticos: (a) geotêxtil não-tecido; (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).	87
Figura 44 - Ensaio de cisalhamento direto: (a) geossintético entre duas camadas de solo e (b) geossintético colado em base rígida.	88
Figura 45 - Possíveis configurações do ensaio de cisalhamento direto (Ingold, 1990).	90
Figura 46 - Equipamento reportado por Koutsourais <i>et al.</i> (1991).	91
Figura 47 - Equipamento reportado por Dembicki <i>et al.</i> (1991) - Vista Lateral.	92
Figura 48 - Equipamento reportado por Dembicki <i>et al.</i> (1991). (a) sistema de aplicação de tensão normal; (b) detalhe do sistema de aplicação normal e (c) caixa de ensaio.	92
Figura 49 - Equipamento reportado por Gomes (1993).	93
Figura 50 - Equipamento reportado por Alfaro <i>et al.</i> (1995). (a) Vista lateral e (b) detalhes do equipamento.	94
Figura 51 - Equipamento reportado por Lee e Manjunath (2000).	95
Figura 52 - Equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões - CEDEX-Madri (Sieira, 2003).	96
Figura 53 - (a) Caixas de ensaio do equipamento do CEDEX-Madri, (b) sistemas de aplicação de tensão normal e (c) sistema de aplicação de tensão cisalhante (Sieira, 2003).	96
Figura 54 - Efeito da posição relativa nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geotêxtil tecido tricotado, caixa 300mm x 300mm (Adaptado de Ingold, 1984).	100
Figura 55 - Efeito da posição relativa nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geogrelha, caixa 300mm x 300mm (Adaptado de Ingold, 1984).	100
Figura 56 - Equipamento utilizado por Nakamura <i>et al.</i> (1999).	101
Figura 57 - Configurações da posição do reforço (Nakamura <i>et al.</i> 1999).	101
Figura 58 - Relação entre a tensão de cisalhamento e os deslocamentos horizontal e vertical (Nakamura <i>et al.</i> , 1999).	102
Figura 59 - Efeito da dimensão do equipamento nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geotêxtil tecido tricotado (Adaptado de Ingold, 1984).	104

Figura 60 - Efeito da dimensão do equipamento nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geogrelha (Adaptado de Ingold, 1984).....	104
Figura 61 - Efeito das dimensões do equipamento de cisalhamento direto para geogrelha e areia (Adaptado de Saez, 1997).	105
Figura 62 - Influência da espessura de solo da caixa superior na interface areia-geotêxtil em ensaios de cisalhamento direto (Gourc <i>et al.</i> 1996).....	106
Figura 63 - Influência do suporte no atrito entre a geogrelha e a areia (Gourc <i>et al.</i> 1996).....	107
Figura 64 - Condições de fronteiras típicas em ensaios de cisalhamento direto (Palmeira, 1999).	108
Figura 65 - Ensaios de cisalhamento direto em areia densa com diferentes condições de fronteira (Palmeira, 1987).....	109
Figura 66 - Representação esquemática do aparelho de cisalhamento direto em que a carga é aplicada de cima para baixo no topo da caixa superior (Nakamura <i>et al.</i> , 1999) - Configuração B.	109
Figura 67 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto obtidos com o equipamento da Figura 56 e o equipamento da Figura 66 (Nakamura <i>et al.</i> , 1999).....	110
Figura 68 - Materiais utilizados por Lee e Manjunath (2000).....	112
Figura 69 - Efeito da rigidez do geossintético (Jewell e Wroth, 1987).....	113
Figura 70 - Efeito do confinamento na rigidez de geossintéticos (Gomes, 1993).	114
Figura 71 - Efeito da rugosidade na resistência da interface (Izgin e Wastin, 1998).	114
Figura 72 - Estrutura principal do equipamento desenvolvido.....	121
Figura 73 - Ligação do pórtico.	122
Figura 74 - Vista geral do ponto de apoio do sistema de aplicação de força cisalhante dos ensaios de cisalhamento, arrancamento e fluência.....	122
Figura 75 - Plataforma de ensaios.	123
Figura 76 - Dobradiça.....	123
Figura 77 - Local de fixação do sistema de basculamento.....	124
Figura 78 - Conjunto de caixas de ensaio 1 - Versão original.....	125

Figura 79 - Detalhe da roldana da caixa superior sobre o trilho da caixa inferior.	126
Figura 80 - Garra do conjunto 1 de caixas - Versão original.	126
Figura 81 - Caixas de ensaio com altura de 10 cm.	127
Figura 82 - Novo sistema trilho roldana.	128
Figura 83 - Sistema de regulagem do espaçamento das caixas de ensaio.	129
Figura 84 - Limitador de deslocamento (esticado).	129
Figura 85 - Conjunto 2 de caixas de ensaio.	131
Figura 86 - Detalhe do redutor de comprimento da caixa inferior.	131
Figura 87 - Conjunto 3 de caixas de ensaio.	131
Figura 88 - Conjunto 4 de caixas de ensaio.	131
Figura 89 - Conjunto de caixas de ensaio número 5.	132
Figura 90 - Conjunto de caixas de ensaio número 6.	132
Figura 91 - Garras das caixas de ensaio: (a) garra dos conjuntos de caixas de ensaio 2 e 4, (b) garra do conjunto de ensaio 3 e (c) garra dos conjuntos de caixas ensaio 5 e 6.	133
Figura 92 - Garra móvel do conjunto 6 de caixas de ensaio (Becker, 2006).	134
Figura 93 - Sistema de Basculamento: (a) Detalhe da fixação da talha e (b) Detalhe da fixação da corrente da talha.	135
Figura 94 - Tampas do sistema de confinamento. (a) caixa superior do conjunto 2 e (b) caixa superior do conjunto 4.	135
Figura 95 - Sistema de confinamento dos ensaios de Rampa e Cisalhamento Direto Inclinado. (a) Ensaio de rampa com tensão confinante de 3,3kPa e (b) Ensaio de rampa com tensão confinante de 4,7kPa.	136
Figura 96 - Ensaio de rampa sob tensão confinante de 3,3kPa.	137
Figura 97 - Vista lateral do sistema de confinamento do ensaio de cisalhamento direto convencional.	138
Figura 98 - Vista frontal do sistema confinamento do ensaio de cisalhamento direto convencional.	138
Figura 99 - Placa de reação para a o conjunto de caixa superior do conjunto 2.	139
Figura 100 - Detalhe da rótula do ponto de reação.	139
Figura 101 - Vista superior do pendural de carga.	140

Figura 102 - Detalhe do sistema de aplicação de tensões cisalhantes do ensaio de cisalhamento direto e inclinado: (a) ligação na caixa superior e (b) plataforma de carga.....	141
Figura 103 - Conjunto hidráulico Enerpac.....	142
Figura 104 - Detalhe do sistema de aplicação de tensão cisalhante.....	142
Figura 105 - Detalhe do sistema de arrancamento.....	143
Figura 106 - Medidor de ângulo de rampa com base magnética.....	143
Figura 107 - Posição do medidor na borda da caixa.....	143
Figura 108 - Fixação do <i>tell-tale</i> na caixa superior.....	144
Figura 109 - Dispositivo do tipo <i>tell-tale</i>	144
Figura 110 - Medidor de deslocamento horizontal marca Gefran.....	144
Figura 111 - Instrumentos para a medição de cargas: (a) manômetro Enerpac e (b) célula de carga Kratos.....	145
Figura 112 - Configuração RP25Q-10.....	147
Figura 113 - Configuração RP50Q-10.....	147
Figura 114 - Configuração RP50R-10.....	147
Figura 115 - Configuração RP100Q-5.....	147
Figura 116 - Configuração RP100Q-10.....	148
Figura 117 - Vista lateral da configuração de ensaio de rampa.....	148
Figura 118 - Vista superior da configuração de ensaio de rampa.....	149
Figura 119 - Vista frontal da configuração de ensaio de rampa.....	149
Figura 120 - Configurações de ensaio com caixas com altura reduzida.....	150
Figura 121 - Vista lateral da configuração RP25Q-10 com faces inclinadas a 30 graus.....	151
Figura 122 - Configuração CI25Q-10.....	152
Figura 123 - Configuração CI50R-10.....	152
Figura 124 - Configuração CI100Q-10.....	152
Figura 125 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto inclinado.....	153
Figura 126 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto inclinado.....	153
Figura 127 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto inclinado.....	154
Figura 128 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	156
Figura 129 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	156

Figura 130 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	157
Figura 131 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC100Q-10.....	157
Figura 132 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	158
Figura 133 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	158
Figura 134 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.....	159
Figura 135 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.....	159
Figura 136 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.....	160
Figura 137 - Configurações das caixas e posicionamento do geossintético em ensaios de cisalhamento direto.	160
Figura 138 - Vista superior da configuração de arrancamento.....	162
Figura 139 - Vista frontal da configuração de arrancamento.....	162
Figura 140 - Vista lateral da configuração de arrancamento.....	163
Figura 141 - Configuração das caixas de ensaio de arrancamento AR120R-30 .	163
Figura 142 - Avaliação do sistema de aplicação de força cisalhante.	164
Figura 143 - Ensaio do sistema de aplicação de força cisalhante.....	165
Figura 144 - Resultados típicos dos testes de avaliação de desempenho do sistema de aplicação de força cisalhante.	166
Figura 145 - Condição de tombamento do sistema de confinamento com a inclinação da plataforma de ensaios (Aguiar, 2003).	168
Figura 146 - Exemplo de análise de tombamento das caixas de ensaio do conjunto 1.....	169
Figura 147 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 2 de caixas de ensaio.....	170
Figura 148 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 3 de caixas de ensaio.....	170
Figura 149 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 4 de caixas de ensaio.....	171

Figura 150 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 5 de caixas de ensaio.....	171
Figura 151 - Areia de Ipanema.....	174
Figura 152 - Curva granulométrica da areia de Ipanema.....	175
Figura 153 - Geossintéticos utilizados na pesquisa: (a) geomenbrana Cipageo, (b) geogrelha Fortrac e (c) geomembrana Polimanta.....	177
Figura 154 - Recomendação de descarte da Norma DIN EN 963.....	178
Figura 155 - Amostra de geogrelha na caixa média quadrada (dimensões 0,70 x 0,90m).....	178
Figura 156 - Compactadores utilizados para as densidades relativas de 45 e 90%.	179
Figura 157 - Seqüência construtiva de preparação de um corpo de prova - caixa inferior.....	179
Figura 158 - Geogrelha na posição de ensaio.....	180
Figura 159 - Seqüência construtiva de preparação de um corpo de prova - caixa superior.....	181
Figura 160 - Colocação das placas de confinamento.....	182
Figura 161 - Procedimento para espaçar a caixa de ensaio.....	182
Figura 162 - Posição do medidor de ângulo de base magnética.....	182
Figura 163 - Bloqueio da caixa superior com grampos tipo C.....	183
Figura 164 - Instalação dos anéis de carga.....	183
Figura 165 - Instalação dos cabos de aço nos anéis de carga da caixa superior..	183
Figura 166 - Instalação dos suportes das roldanas e da plataforma.....	184
Figura 167 - Nivelamento da plataforma.....	184
Figura 168 - Ensaio de rampa finalizado - vista lateral.....	185
Figura 169 - Resultado típico de um ensaio de rampa.....	186
Figura 170 - Aplicação de tensão normal em um ensaio de interface solo-geogrelha ($\sigma_c=8,4\text{kPa}$).....	187
Figura 171 - Aplicação de tensão cisalhante.....	187
Figura 172 - Resultado típico de um ensaio de cisalhamento direto.....	188
Figura 173 - Inclinação da plataforma para ensaio de cisalhamento direto inclinado. Observa-se o grampo tipo C impedindo o movimento da caixa superior.....	189
Figura 174 - Resultado típico de um ensaio de cisalhamento direto inclinado..	189

Figura 175 - Esquema de forças do ensaio de rampa.	190
Figura 176 - Esquema de forças do ensaio de cisalhamento direto inclinado.	192
Figura 177 - Resultados típicos de ensaios de rampa - interface Ar15 x Ar15...	200
Figura 178 - Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto convencional - interface Ar15 x GG35.	200
Figura 179 - Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto inclinado - Ar15 x GMPL.	201
Figura 180 - Fases do movimento do elemento superior da interface com o aumento da inclinação α do plano inclinado: (a) fase 1, fase estática; (b) fase 2, fase transitória; (c) fase 3, fase de deslizamento não estabilizado (Pitanga <i>et al.</i> , 2007).	202
Figura 181 - Diferentes mecanismos de deslizamento observados nos ensaios: (a) deslizamento súbito; (b) deslizamento irregular; (c) deslizamento gradual.	203
Figura 182 - Fatores que influenciam os resultados dos ensaios.	210
Figura 183 - Distribuição de tensões para a configuração de ensaio de rampa RP25Q-10.	212
Figura 184 - Variação da altura de solo na caixa de ensaio - Configuração RP25Q-10.	213
Figura 185 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x Ar15.	214
Figura 186 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP50Q-10, interfaces Ar15 x Ar15.	215
Figura 187 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação $L/h = 20$, interfaces Ar15 x Ar15.	216
Figura 188 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x GG35.	216
Figura 189 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP50R-10, interfaces Ar15 x GG35.	217
Figura 190 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação $L/h = 20$, interfaces Ar15 x GG35.	218
Figura 191 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x GMPL.	218
Figura 192 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação $L/h = 20$, interfaces Ar15 x GMPL.	219

Figura 193 - Variação da forma e tamanho da área de contato.	220
Figura 194 - Comparação dos resultados de ensaios de rampa, em termos de ângulo de atrito secante, para interfaces solo-solo.	222
Figura 195 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência.....	223
Figura 196 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência.	224
Figura 197 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana em termos de envoltória de resistência.....	224
Figura 198 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência.	225
Figura 199 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência.	225
Figura 200 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 18°.....	226
Figura 201 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 18°.....	226
Figura 202 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geomembrana em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 4,5°.....	227
Figura 203 - Envoltórias de resistência solo-solo obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.....	229
Figura 204 - Envoltórias de resistência solo-geogrelha obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.....	229
Figura 205 - Envoltórias de resistência solo-geomembrana obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.	230
Figura 206 - Esquema interno da caixa superior de ensaio da configuração RP25Q-10 utilizado na avaliação da metodologia de ensaio com faces: (a) normais e (b) inclinadas.....	230
Figura 207 - Face inclinada frontal.	231

Figura 208 - Ensaio de rampa para interfaces solo-geomembrana: amostras com defeito e muito uso.	232
Figura 209 - Ensaio de rampa para interfaces solo-geomembrana: amostras com uso controlado e novas.	233
Figura 210 - Comparação entre os resultados dos ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana.	234
Figura 211 - Ensaio de cisalhamento direto para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.	235
Figura 212 - Ensaio de cisalhamento inclinado (plataforma inclinada de 4,5 graus) para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.	235
Figura 213 - Ensaio de cisalhamento inclinado (plataforma inclinada de 9°) para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.	236
Figura 214 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa, em ensaios de rampa.	241
Figura 215 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas da interface areia-areia.	242
Figura 216 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.	242
Figura 217 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geogrelha nas densidade relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa em ensaios de rampa.	244
Figura 218 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas da interface areia-geogrelha.	244
Figura 219 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.	245
Figura 220 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana Cipageo nas densidade relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa, em ensaios de rampa.	247
Figura 221 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana Polimanta nas densidades relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,8kPa, em ensaios de rampa.	248

Figura 222 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas - Interface areia-geomembrana Cipageo.....	249
Figura 223 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas - Interface areia-geomembrana Polimanta.....	249
Figura 224 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana Cipageo nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa....	250
Figura 225 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana Polimanta nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.	250
Figura 226 - Envoltórias de resistência das interfaces ensaiadas em areia com: (a) $D_r=15\%$; (b) $D_r=45\%$ e (c) $D_r=90\%$, obtidas em ensaios de rampa.....	251
Figura 227 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-areia e brita-brita e tensão confinante intermediária, obtidas em ensaios de rampa.	254
Figura 228 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita com densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.	255
Figura 229 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha e tensão confinante intermediária, em ensaios de rampa.	256
Figura 230 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa. .	257
Figura 231 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geomembrana (2,8kPa) e brita-geomembrana (2,5kPa), em ensaios de rampa.	258
Figura 232 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.	259
Figura 233 - Envoltórias de resistência das interfaces com: (a) areia e (b) brita.	260
Figura 234 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa em ensaios de cisalhamento direto convencional.	266

Figura 235 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%.....	267
Figura 236 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa em ensaios de cisalhamento direto convencional.	268
Figura 237 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para densidade relativa de 15% em ensaios de cisalhamento direto convencional.....	269
Figura 238 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geomembrana (3,2kPa) e brita-geomembrana (2,4kPa) em ensaios de cisalhamento direto convencional.	270
Figura 239 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15% em ensaios de cisalhamento direto convencional.	271
Figura 240 - Envoltórias de resistência obtidas de ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces com areia (a) e brita (b).	272
Figura 241 - Influência da inclinação no valor da tensão cisalhante de ruptura.	278
Figura 242 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma de ensaios inclinada a 9°.	280
Figura 243 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma de ensaios inclinada a 18°.	280
Figura 244 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.....	281
Figura 245 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 18°.....	281
Figura 246 - Envoltória de ruptura da interface areia-areia para densidade relativa de 15%, plataforma inclinada a 18° e empregando a configuração RP50R-10.	282
Figura 247 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma inclinada a 9°.....	284

Figura 248 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma inclinada a 18°.....	285
Figura 249 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.....	285
Figura 250 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 18°.....	286
Figura 251 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geomembrana e brita-geomembrana para $\sigma = 1,8\text{kPa}$ e plataforma inclinada a 4,5°.....	288
Figura 252 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geomembrana e brita-geomembrana para $\sigma = 1,8\text{kPa}$ e plataforma inclinada a 9°.....	288
Figura 253 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 4,5.....	289
Figura 254 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.....	290
Figura 255 - Envoltórias de resistência das interfaces com areia obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 4,5°.....	291
Figura 256 - Envoltórias de resistência das interfaces com (a) areia e (b) brita, obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 9°.....	292
Figura 257 - Envoltórias de resistência das interfaces com (a) areia e (b) brita, obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 18°.....	293
Figura 258 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15xAr15.....	299
Figura 259 - Envoltórias de resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15.....	300
Figura 260 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15XGG35.....	302
Figura 261 - Envoltórias de Resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15XGG35.....	302

Figura 262 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15xGMPL.....	304
Figura 263 - Envoltórias de Resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xGMPL.....	305
Figura 264 - Trajetória das tensões normais e cisalhantes nos ensaios de rampa (RP), cisalhamento direto convencional (CC) e inclinado (CI).....	306
Figura 265 - Configuração de ensaio de rampa RP25Q-10 (vista frontal).....	321
Figura 266 - Configuração de ensaio de rampa RP25Q-10 (vista lateral).....	322
Figura 267 - Configuração de ensaio de rampa RP25Q-10 (vista superior).	322
Figura 268 - Configuração de ensaio de rampa RP50Q-10 (vista frontal).....	323
Figura 269 - Configuração de ensaio de rampa RP50Q-10 (vista lateral).....	324
Figura 270 - Configuração de ensaio de rampa RP50Q-10 (vista superior).	324
Figura 271 - Configuração de ensaio de rampa RP50R-10 (vista frontal).....	325
Figura 272 - Configuração de ensaio de rampa RP50R-10 (vista lateral).....	326
Figura 273 - Configuração de ensaio de rampa RP50R-10 (vista superior).....	326
Figura 274 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 (vista frontal).....	327
Figura 275 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 (vista lateral).....	328
Figura 276 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 (vista superior).	328
Figura 277 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-10 (vista frontal).....	329
Figura 278 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-10 (vista lateral).....	330
Figura 279 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-10 (vista superior).	330
Figura 280 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI25Q-10 (vista frontal).	332
Figura 281 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI25Q-10 (vista lateral).....	333
Figura 282 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI25Q-10 (vista superior).....	333
Figura 283 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI50R-10 (vista frontal).	334
Figura 284 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI50R-10 (vista lateral).....	335
Figura 285 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI50R-10 (vista superior).....	335

Figura 286 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI100Q-10 (vista frontal).....	336
Figura 287 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI100Q-10 (vista lateral).....	337
Figura 288 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI100Q-10 (vista superior).....	337
Figura 289 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC25Q-10 (vista frontal).....	339
Figura 290 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC25Q-10 (vista lateral).....	340
Figura 291 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC25Q-10 (vista superior).....	340
Figura 292 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC50Q-10 (vista frontal).....	341
Figura 293 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	342
Figura 294 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	342
Figura 295 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC100Q-10.....	343
Figura 296 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	344
Figura 297 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.....	344
Figura 298 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.....	345
Figura 299 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.....	346
Figura 300 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.....	346
Figura 301 - Configuração de ensaio de arrancamento ArG-1 (vista frontal).....	348
Figura 302 - Configuração de ensaio de arrancamento ArG-1 (vista lateral).....	349
Figura 303 - Configuração de ensaio de arrancamento ArG-1 (vista superior).....	349
Figura 304 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 1.....	350

Figura 305 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 2	351
Figura 306 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 3	351
Figura 307 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 4	352
Figura 308 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 5	352
Figura 309 - Curva granulométrica do solo silto-argiloso.....	354
Figura 310 - Envoltória de resistência obtida dos ensaios de cisalhamento direto (Becker, 2003).	355
Figura 311 - Geossintéticos ensaiados: (a) Geotêxtil, (b) Geogrelha e (c) Geomembrana.....	357
Figura 312 - Curva granulométrica da areia e da brita.....	358
Figura 313 - Amostras representativas da areia (esquerda) e brita (direita).....	359
Figura 314 - Envoltórias de ruptura da areia.....	360
Figura 315 - Geossintéticos ensaiados: (a) Geomembrana, (b) Geogrelha.....	361
Figura 316 - Curvas granulométricas da areia e da brita.....	362
Figura 317 - Geossintéticos ensaiados.....	365
Figura 318 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 1.....	367
Figura 319 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 2.....	367
Figura 320 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 3.....	368
Figura 321 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 4.....	369
Figura 322 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 5.....	370
Figura 323 - Critérios de ruptura para solos (Bomfim, 2001).....	372

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais aplicações dos geossintéticos (Vertematti, 2004).....	43
Tabela 2 - Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (Vertematti, 2004)	43
Tabela 3 - Ensaio para Geossintéticos (Adaptado de Palmeira, 1999).....	51
Tabela 4 - Ângulos de atrito de interface dos ensaios de rampa (Izgin e Wasti, 1998).....	75
Tabela 5 - Influência da tensão de confinamento no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001).....	80
Tabela 6 - Influência da tensão confinante nos ângulos de rampa (Aguiar, 2003 e Rezende, 2005).....	81
Tabela 7 - Influência do tipo de geossintético nos resultados dos ensaios de rampa (Aguiar, 2003).....	83
Tabela 8 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para uma tensão confinante de 3,2kPa (Rezende, 2005).....	84
Tabela 9 - Influência da granulometria do solo nos resultados dos ensaios de rampa (Lopes, 2001).....	85
Tabela 10 - Ensaio de cisalhamento direto (modificado de Gomes, 1993).....	97
Tabela 11 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto: interface areia / geomembrana lisa (Hsieh <i>et al.</i> 2002).....	106
Tabela 12 - Influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo- geossintético (Gomes, 1993).....	111
Tabela 13 - Influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo- geossintético (Lee e Manjunath, 2000).....	111
Tabela 14 - Influência do teor de umidade em interfaces solo-solo e solo- geossintético (Gomes, 1993).....	113
Tabela 15 - Influência da granulometria e angularidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993).....	115
Tabela 16 - Ensaio de Rampa - resumo das características.....	116
Tabela 17 - Características das caixas de ensaio.....	130
Tabela 18 - Resumo das características das configurações de ensaio de Rampa	147

Tabela 19 - Resumo das características das configurações de ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado.....	151
Tabela 20 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional	155
Tabela 21 - Resumo das características das configurações de ensaio de arrancamento	161
Tabela 22 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 1 de caixas de ensaio.....	169
Tabela 23 - Características granulométricas da areia de Ipanema.....	175
Tabela 24 - Características físicas da areia de Ipanema	175
Tabela 25 - Características da Geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003).....	176
Tabela 26 - Características da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007).....	176
Tabela 27 - Características da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2003)	177
Tabela 28 - Programa de Ensaio de Rampa	194
Tabela 29 - Programa de Ensaio de Cisalhamento Direto	195
Tabela 30 - Programa de Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	195
Tabela 31 - Ensaio utilizados na avaliação do desempenho do equipamento ...	206
Tabela 32 - Programa de ensaios para estudo da razão comprimento vs altura ..	213
Tabela 33 - Parâmetros de interface obtidos no estudo da influência da relação L/hL	220
Tabela 34 - Ensaio de rampa para avaliação da influência das dimensões do equipamento nos resultados.....	222
Tabela 35 - Resumo dos resultados para os ensaios de cisalhamento	227
Tabela 36 - Resultados dos ensaios de rampa com faces normais e inclinadas para as interfaces solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana	228
Tabela 37 - Influência da tensão confinante nos ângulos de rampa na ruptura...	239
Tabela 38 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-areia e $D_r = 15, 45$ e 90%	240
Tabela 39 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geogrelha e $D_r = 15, 45$ e 90%	243
Tabela 40 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geomembrana CipaGeo e $D_r = 15, 45$ e 90%	246
Tabela 41 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geomembrana Polimanta e $D_r = 15, 45$ e 90%	247

Tabela 42 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces, em ensaios de rampa.....	252
Tabela 43 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-areia e brita-brita.....	253
Tabela 44 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha.....	256
Tabela 45 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana	258
Tabela 46 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces...	261
Tabela 47 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 2,6kPa e $D_r=15\%$, em ensaio de rampa	261
Tabela 48 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces com $D_r = 15\%$, em ensaios de rampa	262
Tabela 49 - Influência da tensão confinante nas tensões cisalhantes de ruptura ($D_r = 15\%$)	265
Tabela 50 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces areia-areia e brita-brita.....	266
Tabela 51 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha.....	268
Tabela 52 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana.....	270
Tabela 53 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces obtidos de ensaios de cisalhamento direto convencional, $D_r = 15\%$	273
Tabela 54 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 2,6kPa, obtidos de ensaios de cisalhamento direto convencional com $D_r = 15\%$	274
Tabela 55 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces obtidos em ensaios de cisalhamento direto convencional com $D_r = 15\%$	274
Tabela 56 - Influência da tensão confinante na tensão cisalhante de ruptura em areia ($D_r = 15\%$).....	277
Tabela 57 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-areia e brita-brita ($D_r = 15\%$)	278
Tabela 58 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha ($D_r = 15\%$).....	283

Tabela 59 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana ($D_r = 15\%$).....	287
Tabela 60 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces...	291
Tabela 61 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para $D_r = 15\%$ e tensão confinante de 1,8kPa.....	294
Tabela 62 - Parâmetros de resistência obtidos para cada interface, com $D_r = 15\%$	295
Tabela 63 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15	298
Tabela 64 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces areia-geogrelha na $D_r=15\%$	301
Tabela 65 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces areia-geomembrana na $D_r=15\%$	303
Tabela 66 - Resumo das características das configurações de ensaio de rampa .	320
Tabela 67 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado.....	331
Tabela 68 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado.....	338
Tabela 69 - Resumo das características da configuração de ensaio de arrancamento	347
Tabela 70 - Características físicas do solo silto-argiloso	353
Tabela 71 - Características do geotêxtil Geofort G300 (Ober, 1999)	356
Tabela 72 - Características da geogrelha Fortrac 55/25-20/30 (Huesker, 2002).	356
Tabela 73 - Características da geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003).....	356
Tabela 74 - Características granulométricas da areia e da brita	359
Tabela 75 - Características físicas da areia e da brita.....	359
Tabela 76 - Características da geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003).....	360
Tabela 77 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2003) .	361
Tabela 78 - Características granulométricas da areia e da brita	363
Tabela 79 - Características físicas da areia e da brita.....	363
Tabela 80 - Característica da Geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003)	364
Tabela 81 - Característica da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007)	364
Tabela 82 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2003) .	365

Lista de Símbolos e Abreviações

a	adesão solo-geossintético
A	área de contato solo-geossintético
b	aresta da base
B	largura do geossintético
c	intercepto coesivo
C	força peso aplicada na plataforma de ensaio
C_c	coeficiente de uniformidade
C_u	coeficiente de curvatura
D	diâmetro
D_{min}	diâmetro mínimo
D_{max}	diâmetro máximo
D_{10}	diâmetro 10%
D_{30}	diâmetro 30%
D_{60}	diâmetro 60%
e	índice de vazios
e_{max}	índice de vazios máximo
e_{min}	índice de vazios mínimo
D_r	densidade relativa
E_c	eficiência de interface em termos de adesão
E_ϕ	eficiência de interface em termos de ângulo de atrito
f	coeficiente de aderência em termos de ângulo de atrito
GCL's	geosynthtetic clay liners
h	altura da amostra de solo ou aresta da base
l	deslocamento
L	comprimento do geossintético
M	momento aplicado
N	força normal
P	força de arrancamento ou peso aplicado
PEAD	polietileno de alta densidade
PET	poliéster

PVA	poliálcool de vinila
PVC	cloreto de polivinila
Q	peso da caixa de ensaio
T	força cisalhante
$T_{\text{máx}}$	ponto de máxima tração no reforço
x	ponto de aplicação da força normal na interface ou braço de alavanca
W	peso da amostra
α	inclinação da plataforma de ensaio ou ângulo de rampa
δ	deslocamento da caixa
γ	peso específico
$\gamma_{\text{máx}}$	peso específico máximo
$\gamma_{\text{mín}}$	peso específico mínimo
ϕ	ângulo de atrito de interfaces solo-solo
ϕ_{sg}	ângulo de atrito de interfaces solo-geossintético
ϕ_{sec}	ângulo de atrito secante
λ	coeficiente de aderência em termos de adesão
θ	ângulo de inclinação do reforço no ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado
σ	tensão normal
$\sigma_{\text{máx}}$	tensão normal máxima
$\sigma_{\text{mín}}$	tensão normal mínima
σ_n	tensão normal nominal ou inicial
σ_{rup}	tensão normal na ruptura
τ	resistência ao cisalhamento do solo
τ_{sg}	resistência ao cisalhamento entre o solo e o geossintético
τ_{rup}	resistência ao cisalhamento na ruptura