



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.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Vinícius Roberto de Aguiar

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

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 Ensaio / 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 Ensaios	192
5.6.1. Ensaios da Tese	193
5.6.2. Ensaios Pré-existentes	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: Ensaios 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: Ensaio 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 Ensaio	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 $T_{máx.}$ 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 Ensaios de Rampa	194
Tabela 29 - Programa de Ensaios de Cisalhamento Direto	195
Tabela 30 - Programa de Ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado	195
Tabela 31 - Ensaios 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 - Ensaios 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 - Ensaios de rampa para as interfaces areia-areia e $D_r = 15, 45$ e 90%	240
Tabela 39 - Ensaios de rampa para as interfaces areia-geogrelha e $D_r = 15, 45$ e 90%	243
Tabela 40 - Ensaios de rampa para as interfaces areia-geomembrana CipaGeo e $D_r = 15, 45$ e 90%	246
Tabela 41 - Ensaios 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 $Dr=15\%$, em ensaio de rampa	261
Tabela 48 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces com $Dr = 15\%$, em ensaios de rampa	262
Tabela 49 - Influência da tensão confinante nas tensões cisalhantes de ruptura ($Dr = 15\%$)	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, $Dr = 15\%$	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 $Dr = 15\%$	274
Tabela 55 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces obtidos em ensaios de cisalhamento direto convencional com $Dr = 15\%$	274
Tabela 56 - Influência da tensão confinante na tensão cisalhante de ruptura em areia ($Dr = 15\%$).....	277
Tabela 57 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-areia e brita-brita ($Dr = 15\%$)	278
Tabela 58 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha ($Dr = 15\%$).....	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
$T_{m\acute{a}x}$	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
$\gamma_{m\acute{a}x}$	peso específico máximo
$\gamma_{m\acute{i}n}$	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
$\sigma_{m\acute{a}x}$	tensão normal máxima
$\sigma_{m\acute{i}n}$	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

1. Introdução

1.1. Motivação

Nas últimas décadas, o uso de materiais geossintéticos em obras de Engenharia Civil tem sido freqüente, notadamente na área de geotecnia. Estes materiais são utilizados em sistemas de reforço, controle de erosão, drenagem, reforço de pavimentos, sistemas de impermeabilização, etc. Sua utilização deve-se às seguintes vantagens: confiabilidade técnica, prazos reduzidos e custos competitivos.

Porém, existe uma demanda de melhoria das técnicas de dimensionamento, calçada, sobretudo, na necessidade de uma maior compreensão do comportamento destes materiais quando inseridos na massa de solo, ou seja, das características da interação entre solo e geossintético.

Este mecanismo de interação é complexo, sendo função, basicamente, das propriedades dos materiais utilizados, solo e geossintético, e quantificado em termos de resistência, pelo coeficiente de adesão (a) e pelo ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}).

Usualmente são utilizados ensaios de campo ou de laboratório para a obtenção destes parâmetros. Os ensaios de campo têm a vantagem de representar mais adequadamente os mecanismos de interação, visto que representam melhor a condição de sua aplicação em obras, porém são de difícil execução e onerosos. Já os ensaios de laboratório têm custos mais acessíveis, sendo os mais utilizados. Porém, mostram alguns inconvenientes tais como o tamanho reduzido da amostra e a influência das condições de contorno.

Segundo Palmeira (1987), a escolha do ensaio mais adequado depende do tipo de movimento relativo entre a massa de solo e o geossintético. Se o geossintético permanecer solidário a uma parte do solo envolvente e a resistência for mobilizada pelo deslizamento da massa restante, o ensaio mais adequado é o de cisalhamento direto convencional (Figura 1 - Situação A). No caso de a

superfície hipotética de ruptura interceptar o reforço e o movimento desta superfície for o mobilizador da resistência, o ensaio mais adequado é o de cisalhamento direto convencional com o reforço inclinado (Figura 1 - Situação B). No caso do geossintético se deslocar em relação à massa de solo e a resistência for mobilizada por este movimento, o ensaio mais adequado é o de arrancamento (Figura 1 - Situação C).

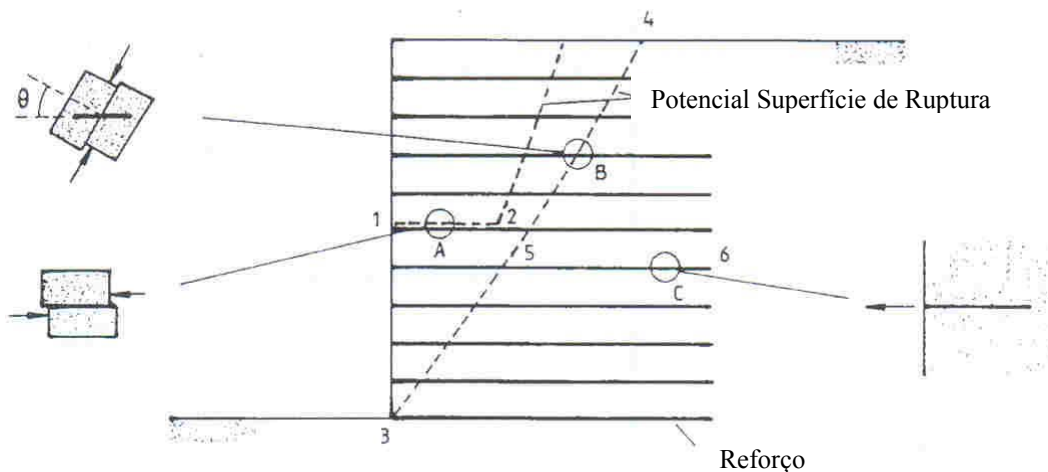


Figura 1 - Modos de interação e movimentos relativos solo-geossintético em um muro de solo reforçado (Palmeira, 1987).

Entretanto, para algumas situações no campo como cobertura de taludes e impermeabilização de barragens de rejeitos (Figura 2), a resistência é mobilizada pelo deslocamento da massa superior de solo em relação ao geossintético, o qual permanece solidário à massa inferior de solo, em plano inclinado. Nestes casos os ensaios mais representativos são os de rampa.

Na literatura é reportada uma série de equipamentos de laboratório capazes de estudar os mecanismos de interação solo-geossintético. Entretanto estes equipamentos são capazes de simular uma ou, no máximo, duas condições de sollicitação. Desta forma, um equipamento capaz de simular os diferentes tipos de sollicitações torna-se vantajoso. Sendo assim, a presente pesquisa se propõe a desenvolver, construir e calibrar um equipamento capaz de realizar os ensaios de cisalhamento direto, cisalhamento direto inclinado e rampa, sob ação de baixas tensões confinantes, e propor configurações para ensaios cisalhamento direto, cisalhamento direto com reforço inclinado e arrancamento, sob ação de médias tensões confinantes.

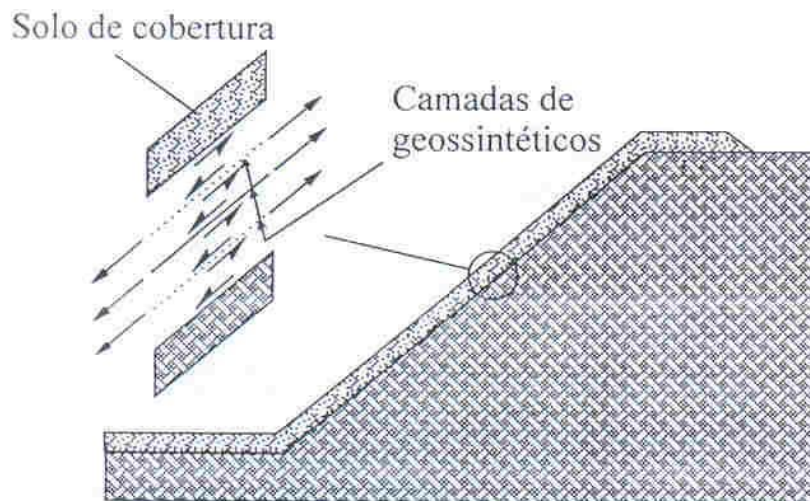


Figura 2 - Sistema de cobertura multicamadas (Melo *et al.* 2003).

1.2. Objetivos

Esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um equipamento capaz de executar ensaios de arrancamento, cisalhamento direto (convencional, inclinado e com o reforço inclinado) e rampa de interfaces solo-geossintéticos utilizando-se uma mesma estrutura de teste.

Nesta pesquisa, priorizou-se a habilitação do equipamento para as configurações de cisalhamento direto, cisalhamento direto inclinado e rampa sob baixas tensões confinantes.

Os ensaios de cisalhamento direto convencional e rampa são ensaios conhecidos, diferentemente do ensaio de cisalhamento direto inclinado. Este ensaio é proposto como uma alternativa ao ensaio de rampa, sendo uma combinação deste com o ensaio de cisalhamento direto convencional. Utiliza-se a designação de cisalhamento direto inclinado por que o ensaio de cisalhamento é realizado sobre a plataforma de ensaios em um ângulo diferente de zero. No decorrer do trabalho vão ser colocadas as vantagens deste novo ensaio.

Desta forma os objetivos da tese são:

- (i) Desenvolvimento de um equipamento de forma a atender às diferentes configurações de ensaios;
- (ii) Calibração do equipamento e análise de seu desempenho por meio de ensaios;
- (iii) Análise da influência das condições de contorno dos ensaios nos resultados de resistência das interfaces;

- (iv) Estudo do comportamento de resistência de interfaces solo-geossintético utilizando-se areia, geogrelha e geomembrana em ensaios de rampa, cisalhamento convencional e inclinado;
- (v) Análise dos fatores de influência da resistência das interfaces tais como granulometria, densidade relativa, tipo de geossintético, tensão confinante e tipo de ensaio utilizado;

1.3. Escopo da Tese

No presente Capítulo são apresentadas a motivação, os objetivos e a estrutura da tese.

Nos Capítulos 2 e 3 são apresentadas as revisões bibliográficas sobre geossintéticos em obras geotécnicas e ensaios para a avaliação da resistência da interface solo-geossintéticos, respectivamente.

O Capítulo 4 apresenta o equipamento desenvolvido, descrevendo-se a estrutura principal, componentes, configurações de ensaio, testes preliminares e limitações de uso.

No Capítulo 5 são descritos o programa de ensaios, os materiais utilizados na pesquisa, a metodologia de preparação dos corpos de prova, as metodologias de ensaio e análise de resultados.

O Capítulo 6 apresenta o critério de ruptura unificado e discute os resultados obtidos nas campanhas de ensaios para calibração e avaliação de desempenho, incluindo-se a precisão do equipamento e influência das dimensões das caixas de ensaios.

Nos Capítulos 7, 8 e 9 são apresentados os resultados e análises dos ensaios para estudo do comportamento das interfaces solo-geossintético, avaliando-se: influência da densidade relativa, tipo de solo, tipo de geossintético e tensão confinante. Já no Capítulo 10 é feita uma comparação dos resultados obtidos.

O Capítulo 11 apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões para os trabalhos futuros.

2. Resistência da Interface Solo-Geossintético

2.1. Considerações Iniciais

A técnica de inserção de materiais para a melhoria da capacidade do solo não é nova. Há cerca de três mil anos, os babilônicos já inseriam materiais fibrosos na construção de “ziggurates” (Figura 3). Para a construção de muros de contenção, os antigos romanos utilizavam troncos perpendiculares à face, imersos em diferentes tipos de solo. Algumas seções da Muralha da China foram construídas com argila e cascalho entremeados com fibras naturais.



Figura 3 - Ziggurates.

Modernamente, o primeiro uso de reforço em pavimentos de que se tem notícia foi realizado pelo departamento de estradas da Carolina do Sul (EUA), em 1926. No entanto, a utilização sistemática deste tipo de material só passou a ocorrer na década de 40, com o desenvolvimento das técnicas de fabricação.

Na década de 60, o arquiteto Henri Vidal desenvolveu e patenteou o sistema “Terra Armada”, o qual utiliza tiras de aço galvanizado como reforço. A partir daí, o conceito de solo reforçado avançou rapidamente, com a criação e desenvolvimento de materiais poliméricos sintéticos.

No Brasil, no início da década de 80, foi executada a primeira obra de grande porte de solo reforçado, na rodovia que liga Taubaté a Campos de Jordão.

Apesar da crescente utilização, o comportamento de materiais poliméricos inseridos em solo é complexo e vem despertando o interesse de pesquisadores e fabricantes.

Dentre as aplicações de geossintéticos em geotecnia existem algumas que exigem o conhecimento das características de interação entre o solo e o geossintético. Estas características são expressas, em termos de resistência, pelos parâmetros de interface adesão (a) e ângulo de atrito de interface solo-geossintético (ϕ_{sg}), obtidos através de ensaios de campo ou de laboratório.

Dessa forma, este capítulo aborda inicialmente, as aplicações e os geossintéticos correspondentes, enfatizando aquelas que requerem o conhecimento dos parâmetros de interface solo geossintético. Em seguida são apresentadas as formas de mobilização da resistência da interface solo-geossintético e os ensaios de laboratório utilizados para avaliar o desempenho destes materiais, mantendo-se a ênfase nos ensaios para avaliação da resistência de interface.

2.2. Utilização de Geossintéticos

A utilização dos diversos geossintéticos em obras geotécnicas tem sido crescente. Koerner (2000) reporta um consumo de 600 milhões de metros quadrados de geotêxteis em 1998, correspondendo a cerca de 500 milhões de dólares (Figuras 4 e 5). Eles vêm substituindo ou reforçando os materiais de construção tradicionais com vantagens econômicas.

A Tabela 1 resume as principais aplicações dos geossintéticos. Um mesmo geossintético pode desempenhar uma ou mais funções em uma mesma aplicação. Nestes casos, devem-se definir quais serão suas funções e hierarquizar-las. Desta forma, podem-se definir quais as características que o geossintético deve possuir para desempenhar as funções definidas (Vertematti, 2004).

A Tabela 2 resume as principais aplicações dos geossintéticos em função dos diferentes tipos.

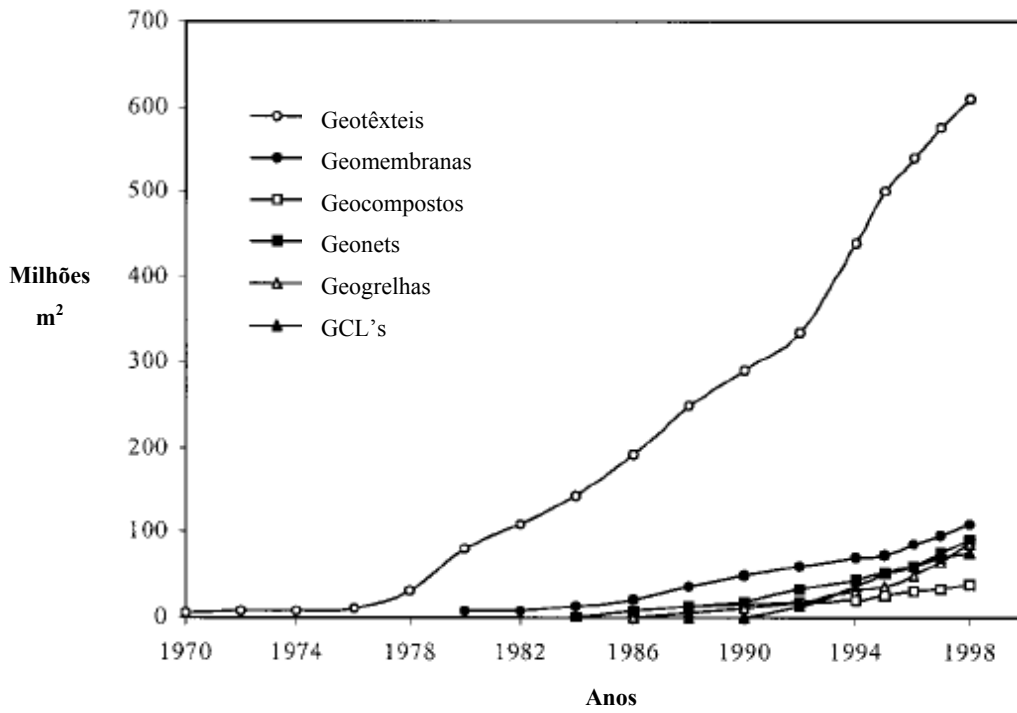


Figura 4 - Consumo de geossintéticos em milhões de metros quadrados por ano na América do Norte (Koerner, 2000).

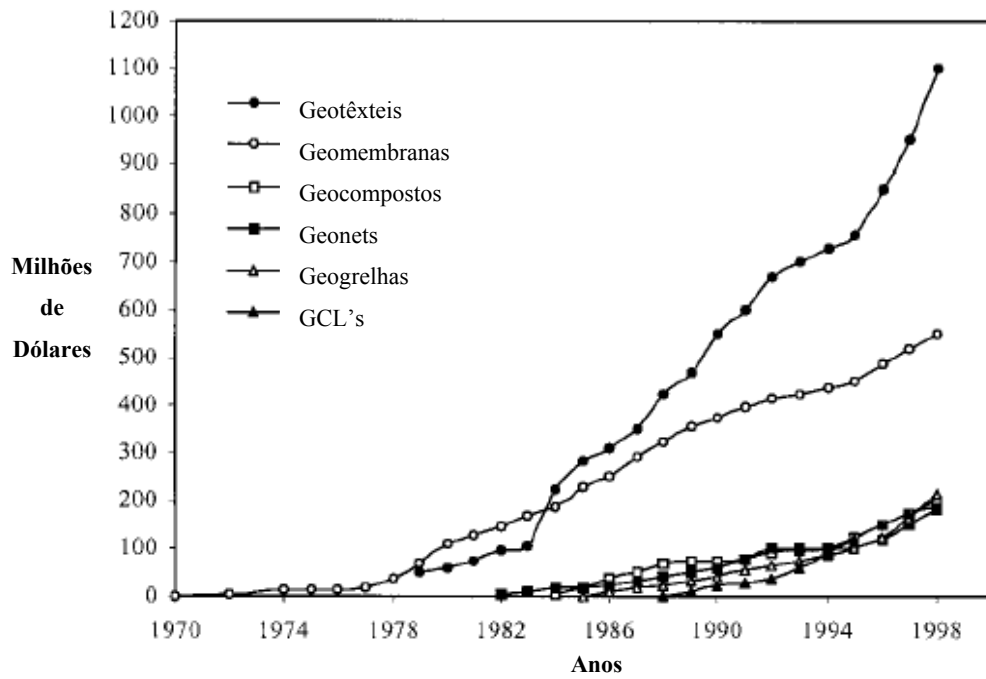


Figura 5 - Valor aproximado, em milhões de dólares, do consumo de geossintéticos na América do Norte (Koerner, 2000).

Tabela 1 - Principais aplicações dos geossintéticos (Vertematti, 2004)

Aplicação	Objetivo
Reforço	Restringir deformações e aumentar a resistência do maciço em obras geotécnicas, aproveitando a resistência à tração do material geossintético.
Filtração	Permitir a passagem e coleta de fluídos, sem a movimentação de partículas do maciço.
Drenagem	Coletar e/ou facilitar os movimentos de fluidos no interior do maciço.
Proteção	Reduzir solicitações localizadas, homogeneizando o nível das tensões que atingiriam determinada superfície ou camada
Separação	Evitar a mistura entre materiais granulares com características geotécnicas distintas.
Impermeabilização	Conter o avanço de uma pluma de contaminação, evitando a migração de líquidos ou gases em aplicações ambientais.
Controle de Erosão	Proteger a superfície do terreno contra o arraste de partículas pela ação de ventos e águas superficiais.

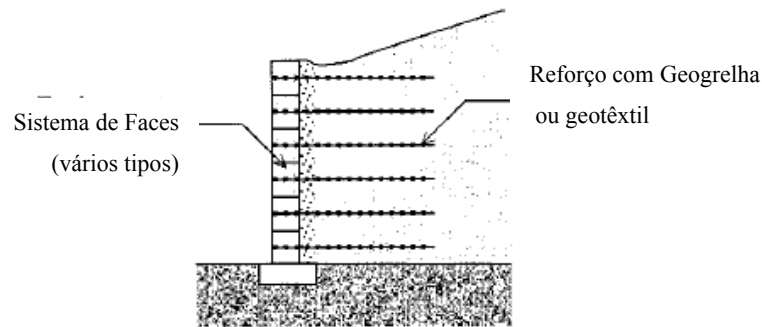
Tabela 2 - Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (Vertematti, 2004)

Geossintético	Aplicação						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Geogrelhas	x						
Geomembranas					x	x	
Geocompostos	x		x			x	
Geobarras	x						
Geoespaçadores			x				
Geotiras	x						
Georredes			x				
Geotubos			x				
Geomantas						x	x
Geocélulas	x						x
Geotêxtil	x	x	x	x	x		x

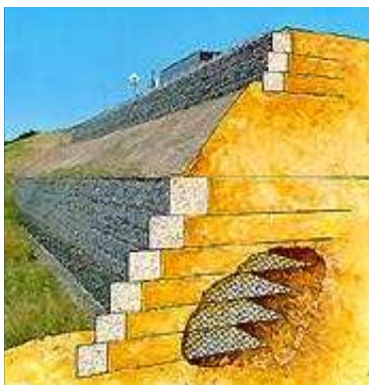
(1) Reforço; (2) Filtração; (3) Drenagem; (4) Proteção; (5) Separação; (6) Impermeabilização ;
 (7) Controle de Erosão

Dentre as aplicações citadas nas Tabelas 1 e 2, as que necessitam do conhecimento dos parâmetros de interface são as de reforço e impermeabilização.

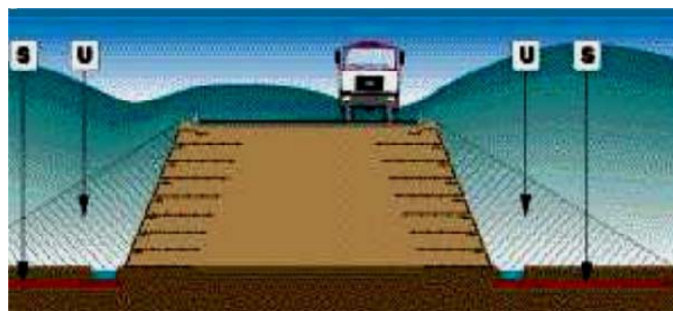
Os geossintéticos com função de reforço podem ser usados em muros de solo reforçado, taludes reforçados, aterros reforçados, barragens e encontros de pontes (Figura 6 e 7), por exemplo.



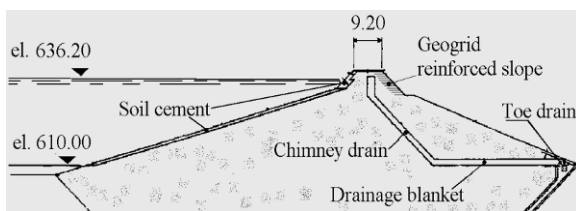
(a) Muro de Solo Reforçado (Koerner, 2000).



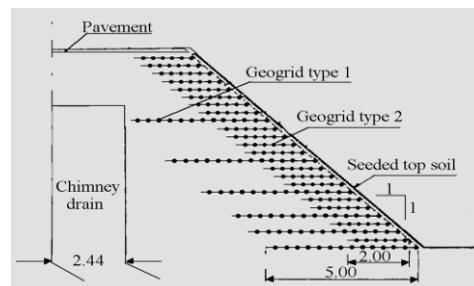
(b) Taludes reforçados



(c) Aterros reforçados



(d) utilização de solo reforçado em barragens - vista geral



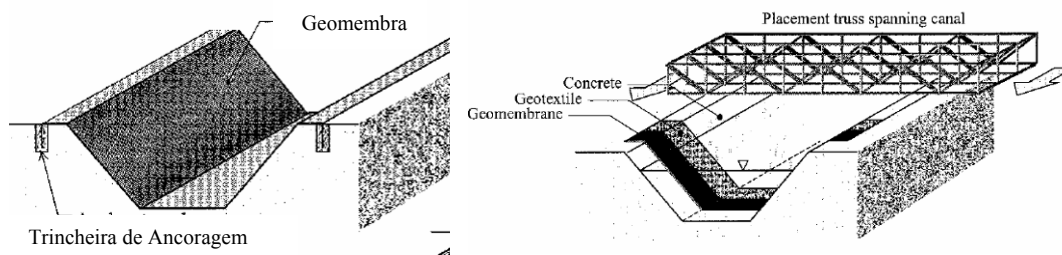
(e) utilização de solo reforçado em barragens - detalhe

Figura 6 - Exemplos de utilização de geossintéticos como reforço.



Figura 7 - Encontro de pontes.

Os geossintéticos com função de impermeabilização podem ser empregados em canais para transporte de líquidos, aterros de resíduos sólidos (Figura 8 e 9), entre outros.



(a) Canais para transporte de líquidos: cobertura simples - impermeabilização com uma camada de geomembrana (Koerner, 2000).

(b) Canais para transporte de líquidos: cobertura composta - impermeabilização utilizando um sanduíche de geomembrana, geotêxtil e concreto (Koerner, 2000).



(c) Lago para disposição de resíduos de bauxita - impermeabilização em construção - Poços de Caldas (MG).

Figura 8 - Exemplos de utilização de geossintéticos como material de impermeabilização.

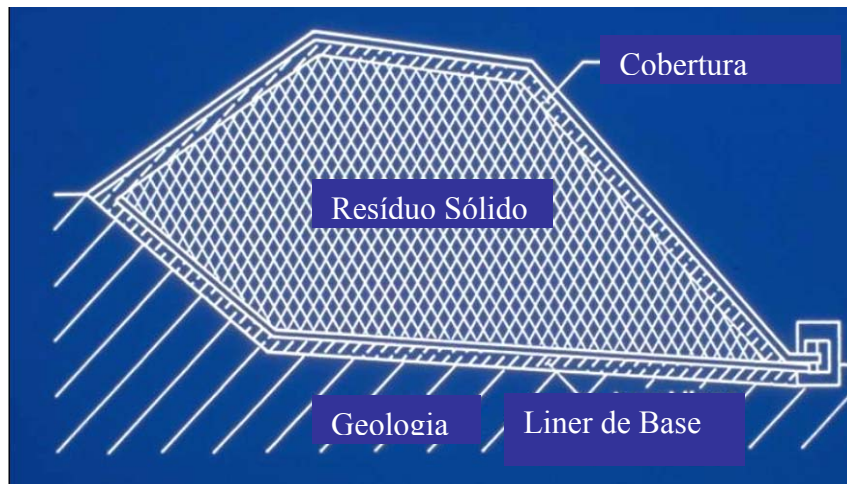


Figura 9 - Esquema de um sistema de cobertura e impermeabilização de um aterro de resíduos sólidos.

Nos casos citados, os parâmetros de interface são empregados no dimensionamento das estruturas de solo reforçado ou na verificação da estabilidade de um sistema de impermeabilização, por exemplo.

2.3. Mobilização da Resistência da Interface Solo-Geossintético

O parâmetro de interface adequado vai depender do tipo de movimento relativo entre o geossintético e a massa de solo. Para cada movimento existe um ensaio de laboratório, ou de campo, que pode ser mais adequado para representar a mobilização da interface (Figura 10).

Os modos possíveis de mobilização da resistência da interface solo-geossintético são: atrito na interface, tração do reforço e arrancamento do reforço.

2.3.1. Atrito na Interface Solo-Reforço

Neste tipo de solicitação o geossintético permanece solidário com parte do solo envolvente, sendo a resistência na interface mobilizada pelo deslizamento relativo entre o restante da massa de solo e o geossintético. Os ensaios utilizados para estes tipos de solicitação são o cisalhamento direto convencional (Figura 10a) e rampa (Figura 10d). As tensões desenvolvidas na interface são funções tanto das deformações no solo imediatamente adjacente ao reforço quanto do deslizamento que ocorre no contato entre o solo e o geossintético. Durante o deslizamento, nota-

se a ocorrência de planos de ruptura paralelos à direção do reforço, cuja localização dependerá das características de deformação e da geometria do geossintético (Castro, 1999).

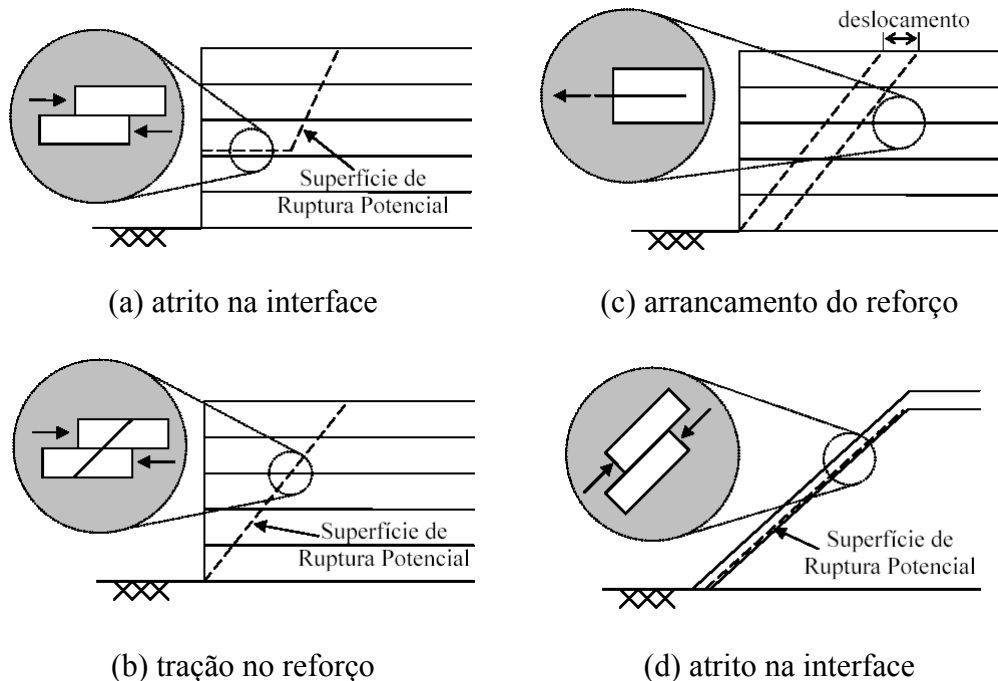


Figura 10 - Modos de interação e movimentos relativos solo-geossintético.

2.3.2. Tração no Reforço

O ponto de tração máxima no reforço ocorre onde este intercepta a superfície potencial de ruptura (Figura 10b). Christopher *et al.* (1990) sugerem hipóteses para definição desta superfície. Para reforços extensíveis, como geotêxteis e geogrelhas de PET e PEAD, considera-se a posição da força de tração máxima ($T_{m\acute{a}x}$) coincidente com a superfície crítica proposta por Rankine (Figura 11a). Para reforços pouco extensíveis, como geogrelhas de poliamida ou geobarras, a superfície crítica apresenta-se mais vertical em virtude das restrições às deformações laterais do sistema solo-reforço (Figura 11b). Este modo de solicitação pode ser simulado em laboratório empregando-se o ensaio de cisalhamento direto com o reforço colocado na caixa de cisalhamento com inclinação específica mantida constante.

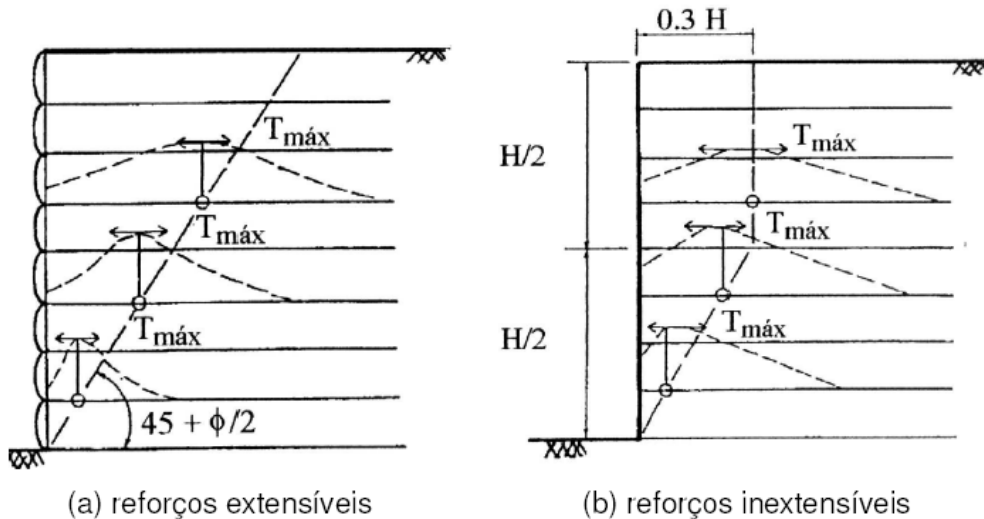


Figura 11 - Ponto de atuação de $T_{\text{máx}}$ para muros reforçados (Christopher *et al.*, 1990).

2.3.3. Arrancamento do Reforço

Este tipo de solicitação ocorre quando os esforços de tração aplicados no geossintético são superiores à resistência que o solo envolvente oferece ao deslocamento relativo entre ambos (Figura 10c). No movimento de arrancamento, o geossintético se desloca em relação ao solo envolvente, sendo este movimento o responsável pela mobilização da resistência na interface. O ensaio adequado para representar esse tipo de solicitação é o de arrancamento.

2.4. Avaliação da Resistência da Interface Solo-Geossintético

A resistência da interface entre o solo-geossintético é função da adesão (a) e do ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}), e é expressa por:

$$\tau_{sg} = a + \sigma \times \tan \phi_{sg} \quad (1)$$

onde:

τ_{sg} = resistência ao cisalhamento entre solo e o geossintético;

a = adesão entre o solo e o geossintético;

σ = tensão normal atuante sobre o plano do geossintético;

ϕ_{sg} = ângulo de atrito entre o solo e o geossintético.

Os valores de a e ϕ_{sg} podem ser obtidos a partir de envoltórias de resistência, bastando-se utilizar, no mínimo, três tensões normais diferentes (Figura 12).

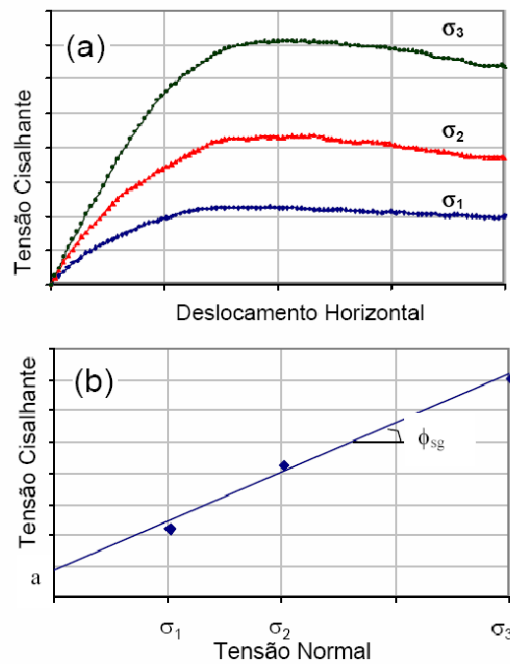


Figura 12 - Obtenção de parâmetros de resistência de interface. (a) curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e (b) envoltória de resistência.

Estes valores podem ser expressos em função dos parâmetros de resistência do solo, c (coesão) e ϕ (ângulo de atrito), através dos coeficientes de aderência, λ e f , definidos como:

$$\lambda = \frac{a}{c} \quad (2)$$

$$f = \frac{\tan \phi_{sg}}{\tan \phi} \quad (3)$$

Substituindo as Equações (2) e (3) na Equação (1), a resistência da interface pode ser expressa da seguinte forma:

$$\tau_{sg} = \lambda \times c + \sigma \times (f \times \tan \phi) \quad (4)$$

Os coeficientes λ e f são também conhecidos como os parâmetros de eficiência de interface solo-geossintético E_c e E_ϕ , respectivamente (Koerner, 1986).

2.5. Ensaio Solo-Geossintético

Como qualquer material de construção, os geossintéticos devem ser ensaiados de modo a se avaliar as suas propriedades relevantes para o perfeito dimensionamento da obra (Palmeira, 1999). Os ensaios para geossintéticos são divididos em dois grupos: ensaios de caracterização e ensaios para avaliação de desempenho (Figura 13).



Figura 13 - Ensaio para geossintéticos (Sayão, 2004).

O ensaio de caracterização tem como objetivo a detecção de falhas de fabricação não sendo necessariamente fiéis à modelagem de situações sofridas pelo geossintético em condições de trabalho em obras geotécnicas ou de proteção ambiental.

Já os ensaios de avaliação de desempenho têm por objetivo simular o mecanismo de sollicitação a que o geossintético possa estar submetido. A escolha do ensaio mais adequado está associada ao tipo de sollicitação ou função a que o geossintético se propõe, que pode ser: reforço, separação, drenagem, filtração, proteção e impermeabilização.

De uma forma geral pode-se classificar os ensaios para geossintéticos conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaio para Geossintéticos (Adaptado de Palmeira, 1999)

Ensaio para a Avaliação da Resistência e Deformabilidade à Tração	Ensaio de Tração Não-Confinada
	Ensaio de Tração Confinada
Ensaio para Drenagem e Filtração	Ensaio de Fluência
	Ensaio de Permeabilidade Normal ao Plano (1)
	Ensaio de Permeabilidade ao Longo do Plano (2)
	Ensaio de Razão entre Gradientes
Ensaio para a Avaliação da Resistência da Interface Solo-Geossintético	Ensaio de Filtração da Fração Fina
	Ensaio para Determinação da Abertura de Filtração de Geotêxteis
	Ensaio de Cisalhamento Direto e seus derivados
	Ensaio de Arrancamento
	Ensaio de Plano Inclinado ou Rampa

Nota: também denominados de: (1) Ensaio de Permissividade; (2) Ensaio de Transmissividade

A ênfase da revisão será para os ensaios de avaliação da resistência de interfaces solo-geossintético, onde a escolha do ensaio mais representativo, para uma determinada situação de campo, vai ser função do tipo de movimento relativo entre o solo e o geossintético (Item 2.3).

2.5.1. Ensaio de Arrancamento

O ensaio de arrancamento (Figura 14) é considerado por muitos autores como o mais apropriado para a previsão das propriedades das interfaces solo-geossintético quando o movimento relativo entre o solo e geossintético corresponde ao arrancamento deste (Farrag *et al.*, 1993).

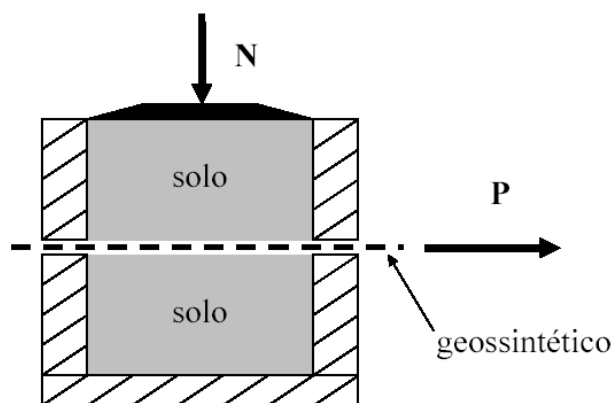
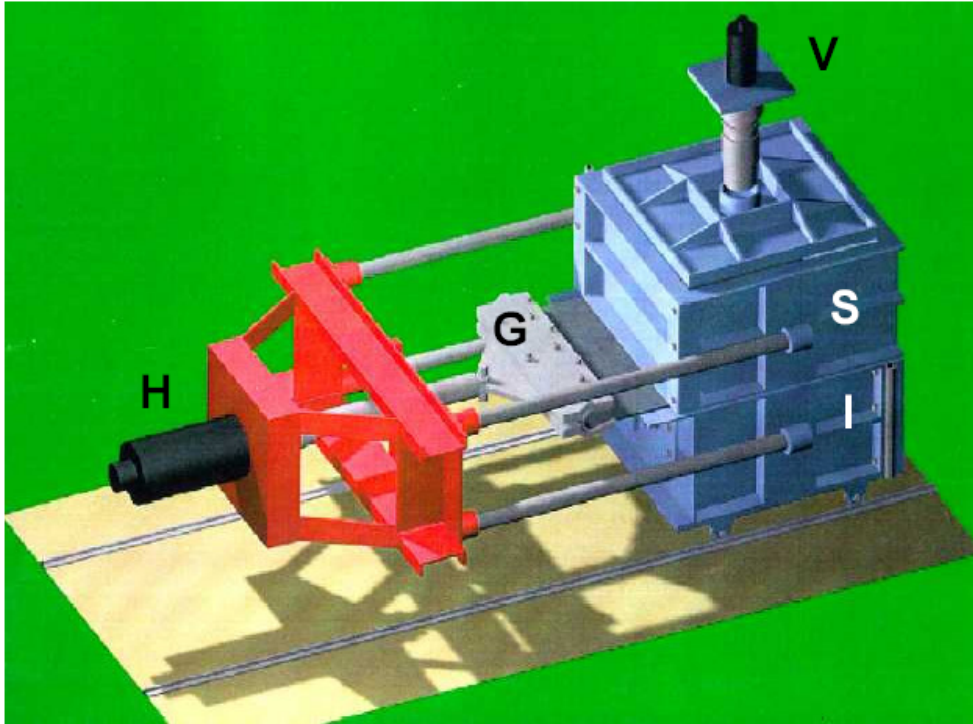


Figura 14 - Esquema de um ensaio de arrancamento.

Este ensaio é realizado em equipamentos de cisalhamento direto, modificados com a introdução de uma garra que impõe os movimentos de arranque ao geossintético. Este movimento relativo entre o geossintético e o solo origina forças de cisalhamento nas duas faces do geossintético, que se opõem ao movimento de arrancamento (Figura 15).



H = Macaco Hidráulico Horizontal

S = Caixa Superior

G = Garra

V = Macaco Hidráulico Vertical

I = Caixa Inferior

Figura 15 - Equipamento para ensaios de arrancamento do CEDEX-Madri (Castro, 1999).

Esta tensão de cisalhamento é definida como a razão entre a força de arrancamento e a área da inclusão solicitada ao arrancamento:

$$\tau_{sg} = \frac{P}{2 \times B \times L} \quad (5)$$

onde:

P = força de arrancamento;

B = largura do geossintético;

L = comprimento enterrado do geossintético.

O ensaio deve ser realizado para, no mínimo, três valores distintos de confinamento vertical. Desta forma, obtém-se a envoltória de resistência e, por consequência, os parâmetros de resistência da interface (a e ϕ_{sg}).

Porém, é importante ressaltar que os resultados podem ser afetados pelo uso de equipamentos diferentes, associados à diferentes condições de fronteiras, diferentes esquemas de colocação e compactação de solo e procedimentos de ensaios (Juran *et al.*, 1988).

Diversos pesquisadores desenvolveram equipamentos capazes de realizar ensaios de arrancamento com geogrelhas e geotêxteis. Eles diferem quanto a dimensões, modos de aplicação de carregamento vertical e as grandezas monitoradas.

Palmeira e Milligan (1989) investigaram a influência da rugosidade da parede frontal nos resultados de ensaios de arrancamento. Eles constataram um aumento do coeficiente de interação solo-geossintético com o aumento da rugosidade. Para reduzir sua influência, sugerem a lubrificação da parede interna e a utilização de uma luva para proteger a extremidade frontal do geossintético.

Lopes e Ladeira (1996) estudaram a influência da presença da luva em ensaios de arrancamento. Para isto utilizaram uma luva de aço inoxidável de 200mm de comprimento. Seus resultados são apresentados na Figura 16. Além de um ganho de 10% na força de arrancamento máxima, verifica-se, também, que os deslocamentos para ensaios sem luva são menores, o que concorda com o aumento da resistência da interface. Diante destes resultados, é aconselhável a utilização de luva nos ensaios de arrancamento.

A influência das condições de contorno nos ensaios de arrancamento é particularmente relevante quando o solo encontra-se no estado denso. Neste estado, o solo tende a aumentar de volume durante o processo de cisalhamento, principalmente quando sujeito a baixas tensões confinantes. Esta tendência pode ser contrariada em laboratório devido à proximidade e às características de rigidez e rugosidade das fronteiras laterais do equipamento. O impedimento da dilatação traduz-se em um aumento da tensão normal atuante no reforço e da tensão cisalhante mobilizada na interface. Como consequência, obtém-se um ângulo de atrito da interface superior ao real (Sieira, 2003).

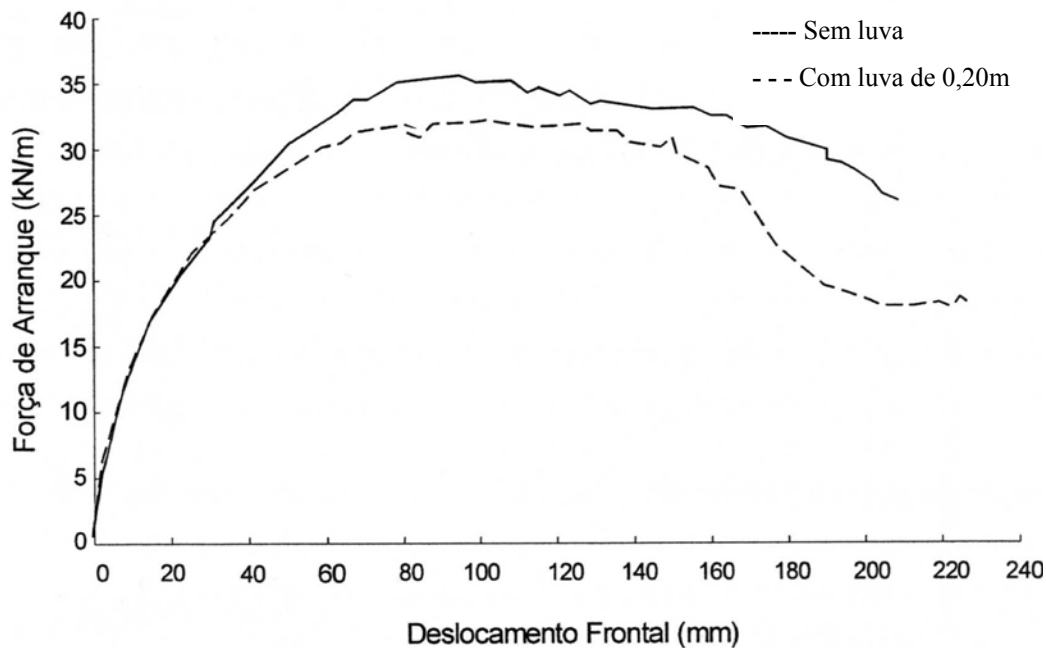


Figura 16 - Influência da manga nos ensaios de arrancamento (Lopes e Ladeira, 1996).

Alguns procedimentos de ensaios também podem influenciar os resultados de arrancamento, tais como, a velocidade de ensaio, a espessura de solo e o método de densificação da amostra.

Lopes e Ladeira (1996) e Rowe e Ho (1986) concluíram que um aumento de velocidade acarreta em um aumento de resistência, resultante da incapacidade do solo de se rearranjar com o aumento da velocidade.

A espessura do solo pode influenciar o valor da resistência da interface solo-geossintético. Esta influência traduz-se em um aumento da tensão confinante no geossintético, especialmente quando a altura de solo é pequena e a dilatância do solo é impedida.

Fannin e Raju (1993) e Farrag *et al.* (1993) sugerem a realização de ensaios de arrancamento com espessuras de solo superiores a 0,30m, acima e abaixo do geossintético. Para espessuras de solo acima deste valor, a influência da espessura na resistência ao arrancamento é praticamente desprezível.

Os diferentes procedimentos de densificação dos solos no interior da caixa de ensaios também influenciam o comportamento tensão x deformação da interface. Farrag *et al.* (1993) e Lopes e Moutinho (1997) ressaltam a importância de normalização do procedimento de densificação das amostras.

2.5.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Neste ensaio o geossintético fica posicionado entre as duas metades da caixa de cisalhamento, sendo a resistência mobilizada pelo deslocamento relativo de uma das metades da caixa em relação ao geossintético (Figura 17). A caixa inferior pode estar preenchida com solo ou por uma base rígida.

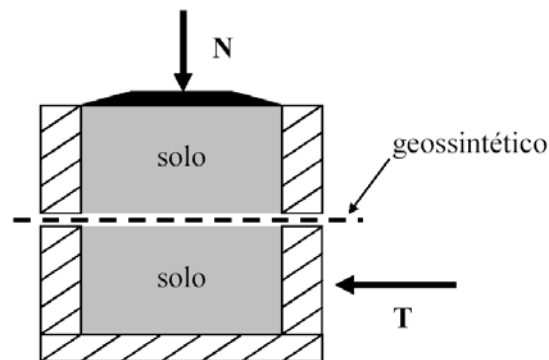


Figura 17 - Esquema de um ensaio de cisalhamento direto.

A utilização, ou não, da base rígida vai ser função do tipo de geossintético usado no ensaio. Na maioria dos ensaios que executados em geotêxteis e geomembranas, o geossintético é colado sobre a base rígida. A vantagem da sua utilização esta associada a fase inicial do adensamento, onde o solo sofre deformações e há uma mudança da posição do geossintético para o início do cisalhamento. No caso de geogrelhas é aconselhável que seja utilizada a caixa inferior preenchida com solo, pois neste tipo de geossintético a resistência de interface solo-geogrelha é composta pelas parcelas de atrito ao longo do geossintético e atrito solo-solo entre as aberturas (Figura 18). Esta última parcela não pode ser obtida quando o geossintético é colado sobre a base rígida.

O ensaio consiste da aplicação de uma tensão normal constante sob a caixa superior com solo. Em seguida mede-se a força horizontal necessária para deslocar a parte superior da caixa de cisalhamento. A tensão cisalhante na ruptura é dada pela razão entre a força horizontal máxima e a área de contato entre as duas caixas de cisalhamento.

Repete-se o ensaio para diferentes tensões normais, a fim de definir uma relação entre tensões cisalhantes e normais e assim obter a envoltória de

resistência e, conseqüentemente, parâmetros de resistência da interface, adesão (a) e ângulo de atrito solo-geossintético (ϕ_{sg}).



Figura 18 - Preparação de um ensaio de cisalhamento direto para uma interface solo-geotelha (Sieira, 2003).

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto podem ser influenciados por diversos fatores, dentre eles: posição relativa solo-geossintético, dimensões do equipamento, rugosidade do plano rígido, dentre outros.

2.5.3. Ensaio de Cisalhamento Direto com o Reforço Inclinado

Este ensaio, esquematizado na Figura 19, simula a situação “b” da Figura 10, onde as tensões cisalhantes na interface são absorvidas pelo reforço, que é então tracionado. Consiste numa derivação do ensaio de cisalhamento direto convencional.

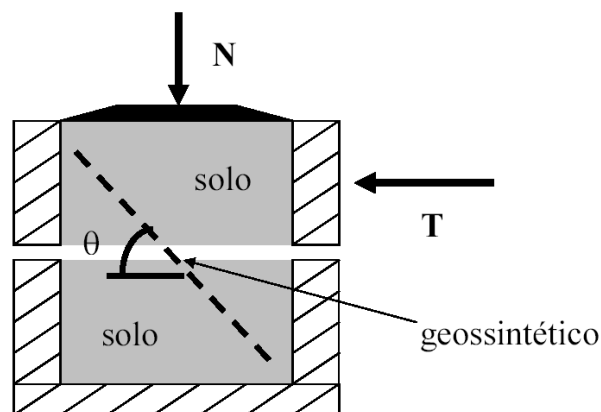


Figura 19 - Esquema de um ensaio de cisalhamento com reforço inclinado.

Jewell e Wroth (1987), Jewell (1990) e Athanasopoulos *et al.* (1990) sugerem que este ensaio seja realizado com amostras maiores que as convencionais, com reforço colocado na vertical ou inclinado de um ângulo θ em relação a esta direção e tendo um comprimento igual na parte superior e inferior da caixa de cisalhamento (Figura 20).

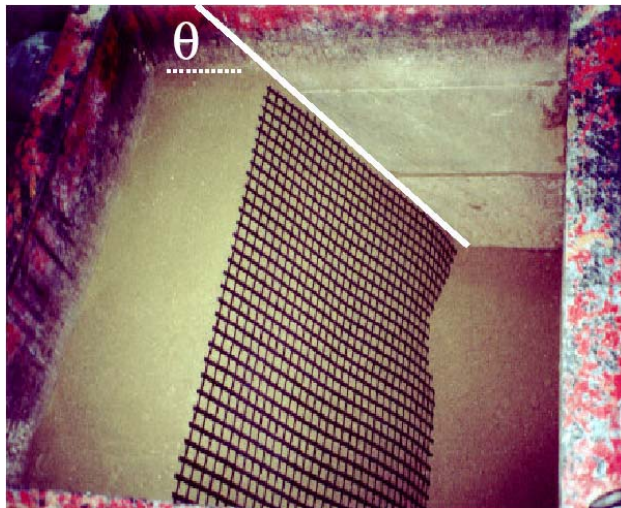


Figura 20 - Preparação de um ensaio de cisalhamento direto com reforço inclinado para uma interface solo-geogrelha (Sieira, 2003).

Jewell (1980), Ingold (1981), Palmeira (1999) e Sieira (2003), através de ensaios com geogrelhas inclinadas imersas em areia, concluíram que o maior ganho de resistência ocorre para a inclinação de 60° . Isto pode ser explicado pelo fato de que a orientação de 60° com a horizontal coincide com a direção de incrementos de deformação de tração na amostra de solo sem reforço. Esta é a orientação mais favorável para a instalação do elemento de reforço.

Athanasopoulos (1993) executou ensaios de cisalhamento direto com um geotêxtil posicionado verticalmente na caixa de cisalhamento. Os ensaios objetivaram o estudo da influência da tensão confinante e da dimensão das partículas de solo no comportamento mecânico da interface solo-geotêxtil. No estudo foram utilizados seis tipos de areia, com valores distintos de diâmetro médio das partículas. As tensões normais aplicadas nos ensaios variaram de 50 até 600kPa. O autor observou que a ruptura do material reforçado pode ocorrer de 2 formas distintas, deslizamento do reforço e deslizamento do conjunto solo-geotêxtil.

Athanasopoulos (1993) observou, também, que o ângulo de atrito da interface (ϕ_{sg}) diminui com o aumento da tensão de confinamento. Para baixos valores de tensão normal, o ângulo de atrito da interface era superior ao ângulo de atrito do solo (ϕ). No entanto, à medida que a tensão normal aumenta, o valor de ϕ_{sg} diminui, tornando-se ligeiramente inferior ao valor de ϕ .

Sayão e Teixeira (1995) executaram ensaios de cisalhamento direto com um geotêxtil inclinado para simular a situação de ruptura de um aterro sobre argila mole. Nestes ensaios, a camada de reforço era posicionada com uma inclinação de 45°, entre camadas de areia e argila. Os autores concluíram que os parâmetros de resistência da interface solo-geotêxtil dependem da inclinação do geotêxtil em relação à superfície de ruptura e que os ensaios de cisalhamento direto devem ser realizados de modo a reproduzir a situação de campo. Desta forma, obtêm-se parâmetros de resistência confiáveis.

2.5.4. Ensaio de Rampa

Para situações de campo como sistemas de controle de erosão e sistemas de impermeabilização, a utilização de parâmetros de interfaces obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto pode conduzir a erros. Estes erros estão associados à utilização de baixos níveis de tensões no ensaio de cisalhamento direto, que pode levar a erros grosseiros e contrários à segurança. (Girard *et al.*, 1990; Giroud *et al.*, 1990 e Gourc *et al.*, 1996).

Desta forma, os ensaios de rampa (Figura 21) representam uma alternativa para modelar problemas de estabilidade de camadas superficiais de geossintéticos em taludes muito inclinados. É considerado um ensaio de qualificação onde é possível reproduzir, por exemplo, a estabilidade de um sistema multicamadas ou a fluência das interfaces, para tensões normais reduzidas (Gourc *et al.*, 1996).

O ensaio consiste em uma caixa rígida que confina uma massa de solo sobre uma camada de geossintético, inicialmente posicionado na direção horizontal e preso ao equipamento. Sob o geossintético encontra-se outra caixa, geralmente maior que a superior, preenchida com solo.

O ensaio é realizado aumentando-se gradativamente a inclinação das caixas até ocorrer o deslizamento ao longo da interface solo-geossintético.

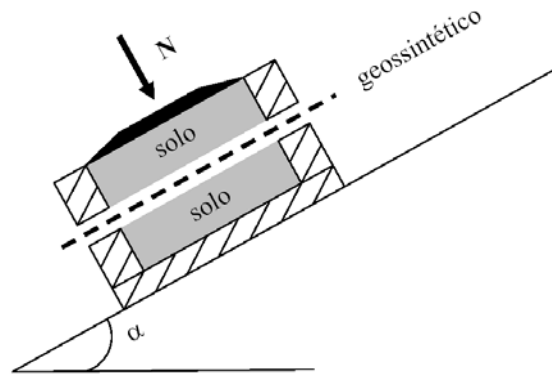


Figura 21 - Esquema de um ensaio de rampa.

O ensaio de rampa é simples, mas apresenta restrições. A primeira é associada à variação da tensão normal com a inclinação da rampa e a segunda corresponde à forma de distribuição da tensão normal. Em geral, assume-se que a distribuição da tensão normal é uniforme ao longo da superfície de contato solo-geossintético, o que não ocorre na prática. Palmeira *et al.* (2002) afirmam que a distribuição das tensões assume uma forma trapezoidal e apresentam valores máximo e mínimo.

2.5.5. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

Segundo Mello (2001), para o estudo da eficiência de interfaces solo-geossintético é necessário conhecer as características de resistência do solo. Para a determinação dos parâmetros de interface solo-solo foi feita uma adaptação no ensaio de cisalhamento direto para que este ensaio fosse realizado em condições semelhantes a do ensaio de rampa, ou seja, baixas tensões normais (Figura 22).

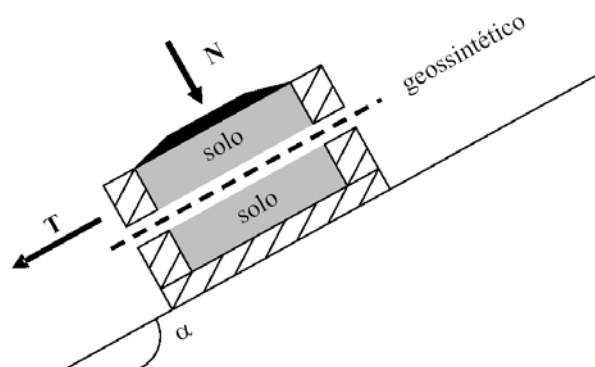


Figura 22 - Esquema de um ensaio de cisalhamento direto inclinado.

Esta adaptação consistiu em fixar o ensaio de cisalhamento direto ao equipamento de ensaio de rampa (Figura 23). O equipamento é composto por duas caixas de aço, onde, permite-se o deslocamento da caixa superior, enquanto a caixa inferior é fixa na rampa de ensaio. A tensão normal é aplicada através de pesos de concreto ou aço. Já os deslocamentos da caixa superior são mensurados através de extensômetros.

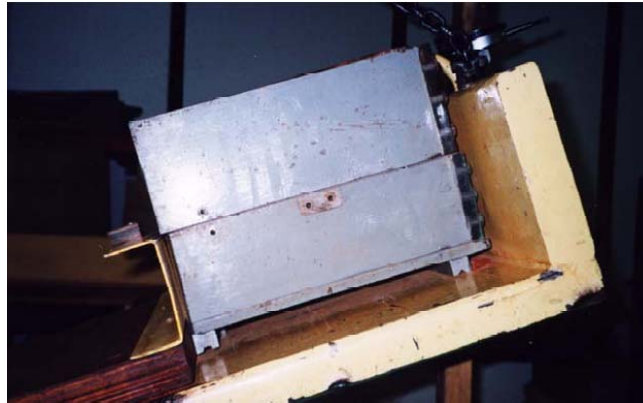


Figura 23 - Equipamento de cisalhamento direto adaptado ao ensaio de rampa (Mello, 2001).

2.6. Considerações Finais

O emprego de materiais geossintéticos em obras de engenharia civil tende a crescer cada vez mais. Devido à sua versatilidade, estes materiais são utilizados como reforço, sistemas de drenagem, sistemas de impermeabilização e controle de erosão. Porém, para uma utilização mais adequada, torna-se importante o conhecimento acurado dos parâmetros de projeto. Para isto podem ser utilizados ensaios de campo e laboratório. Os ensaios de laboratório têm sido os mais utilizados para a obtenção de parâmetros de resistência, dentre eles, destacando-se os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento. Também são utilizados ensaios de cisalhamento com o reforço inclinado e rampa, sendo ambos uma derivação do ensaio de cisalhamento direto. A escolha do ensaio mais representativo depende da forma de mobilização da resistência da interface, ou seja, do movimento relativo entre a massa de solo e o geossintético.

Os parâmetros de interfaces são obtidos através de envoltórias de resistência construídas utilizando-se, no mínimo, três ensaios com tensões confinantes diferentes.

Foram citados cinco tipos de ensaio para obtenção de parâmetros de interface: arrancamento, cisalhamento direto, cisalhamento direto com reforço inclinado, cisalhamento direto inclinado e rampa. Os ensaios de cisalhamento direto e rampa serão estudados em detalhes no Capítulo 3, sendo o objeto deste trabalho. Os outros, arrancamento, cisalhamento direto inclinado e cisalhamento direto com reforço inclinado, tiveram algumas de suas características e condições de contorno abordadas, com a finalidade de subsidiar as suas possíveis configurações de ensaio que serão apresentadas no Capítulo 4.

3. Ensaio para Avaliação da Resistência da Interface

3.1. Considerações Iniciais

Esta tese se propõe a desenvolver, construir e calibrar um equipamento capaz de realizar ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado sob de baixas tensões normais.

Desta forma, o objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão contendo métodos de ensaios, equipamentos reportados e condicionantes associadas ao equipamento e condicionantes associadas aos materiais ensaiados.

3.2. Ensaio de Rampa

Os ensaios de rampa representam uma alternativa para modelar problemas de estabilidade de camadas superficiais de geossintéticos em taludes muito inclinados, sendo considerado um ensaio de qualificação.

A mecânica do ensaio de rampa é simples, como pode ser observado na Figura 24. Consiste em uma caixa rígida com solo, apoiada sobre uma camada de geossintético. Este pode estar apoiado sobre a rampa de ensaio ou sobre outra caixa contendo solo. Todo este conjunto encontra-se inicialmente na horizontal. O ensaio é realizado aumentando-se gradativamente a inclinação da rampa até ocorrer o deslizamento ao longo da interface solo-geossintético.

Estes equipamentos normalmente utilizam caixas de ensaio com áreas de interface variando de 0,005 a 1m²

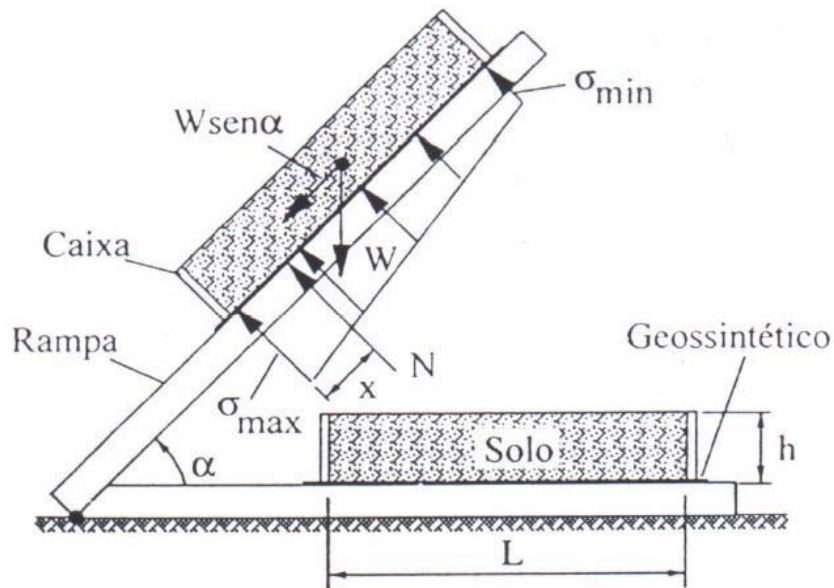


Figura 24 - Mecânica do ensaio de rampa (Melo *et al.*, 2003).

A equação que define a mecânica do ensaio de rampa é a mesma Equação 1 apresentada anteriormente. Entretanto a tensão normal média atuando sobre a superfície de contato solo-geossintético é definida como:

$$\sigma = \frac{W \times \cos \alpha}{A} \quad (6)$$

onde:

σ = tensão normal média que atua na interface;

W = peso da amostra;

A = área de contato solo-geossintético;

α = ângulo de inclinação da rampa.

Para se obter os parâmetros de interface solo-geossintético (a e ϕ_{sg}), basta construir a envoltória de resistência utilizando-se no mínimo três ensaios com tensões de confinamento diferentes, como apresentado anteriormente na Figura 12.

3.2.1. Métodos para ensaio de Rampa

A norma ISO 12957-2 apresenta as recomendações para a execução do ensaio de rampa além das dimensões mínimas da caixa de ensaio e dos instrumentos necessários para monitoração do ensaio (Figura 25).

Os aspectos mais importantes desta norma são resumidos, segundo Lopes (2001):

(i) O equipamento de ensaio pode ser de dois tipos: pode possuir uma base rígida e lisa, onde se coloca o geossintético, ou então, o geossintético pode ser colocado sobre o solo que preenche uma caixa inferior;

(ii) Em qualquer dos casos, a caixa superior, que contém o solo que irá deslizar sobre o geossintético durante o ensaio, deverá ter dimensões internas mínimas de 0,3m de comprimento, 0,3m de largura e 0,05m de profundidade, ou ser de no mínimo sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo;

(iii) A caixa inferior, caso exista, deverá ter dimensões internas mínimas de 0,4m de comprimento, 0,325m de largura e 0,05m de profundidade, ou ser de no mínimo sete vezes a dimensão máxima das partículas de solo;

(iv) O equipamento deve possuir um mecanismo que lhe permita inclinar uma superfície, com uma velocidade que garanta a elevação de uma das suas extremidades de cerca de 5% do comprimento da superfície por minuto. No início de cada ensaio essa superfície deve estar na horizontal;

(v) O equipamento deve possuir dispositivos que lhe permitam medir o deslocamento da caixa superior, a inclinação da superfície em relação à horizontal durante o ensaio, bem como a força aplicada pelo sistema de pesos no solo que preenche a caixa superior;

(vi) O geossintético deve ser assentado na sua superfície de apoio, de modo a evitar qualquer deslocamento relativo entre ele e esta superfície.

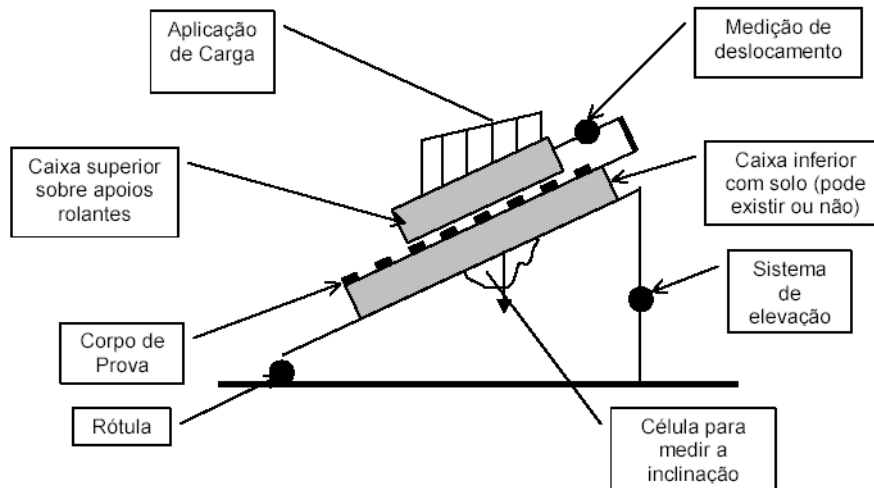


Figura 25 - Representação esquemática do equipamento de ensaio de rampa (Adaptado da ISO 12957-2).

3.2.2. Equipamentos de ensaio de Rampa

A literatura apresenta alguns equipamentos desenvolvidos para ensaios de rampa.

Girard *et al.* (1990) desenvolveram um protótipo de aparelho para ensaios de rampa. Este equipamento foi utilizado para avaliar dois casos de escorregamentos de *lining* em barragens de enrocamento. O equipamento, ilustrado na Figura 26, é composto por uma plataforma metálica com dimensões de 1m x 1m, sobre a qual é fixada uma caixa com 5cm de altura que armazena o solo. As interfaces a serem ensaiadas são assentadas a esta caixa inferior. Neste conjunto coloca-se uma caixa superior de madeira de 20cm de altura, que pode ser totalmente preenchida com solo. Os ângulos são medidos de maneira indireta, utilizando-se uma régua graduada. O procedimento de ensaio consiste em inclinar a rampa com velocidade aproximada de 5cm/min até a ruptura da amostra.

Gourc *et al.* (1996) compararam a aplicabilidade dos ensaios de cisalhamento direto e plano inclinado num projeto onde foram realizados 100 ensaios do primeiro e 75 do segundo, para vários tipos de interface. O equipamento de plano inclinado foi descrito como um aparato composto de uma base de 150cm x 150cm inclinável uma velocidade controlada, caixa superior em dois tamanhos distintos (100cm x 100cm; 50cm x 50cm) para amostras de solo, sendo que a menor delas oferece a possibilidade de inclinação das faces laterais e

um sistema para coleta de dados de inclinação e deslocamento. A inclinação das faces de uma das caixas é justificada por tornar a distribuição de tensões normais sobre a interface mais uniforme durante o ensaio. As tensões normais podem ser aplicadas através do solo de cobertura, como também por placas de aço. Uma peculiaridade deste equipamento de rampa é a possibilidade de determinação do ângulo que ocorre o primeiro deslocamento, ou seja, o ângulo de início de deslocamento. O equipamento é apresentado na Figura 27.

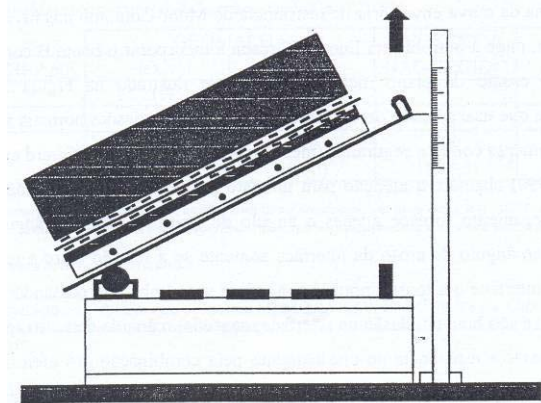
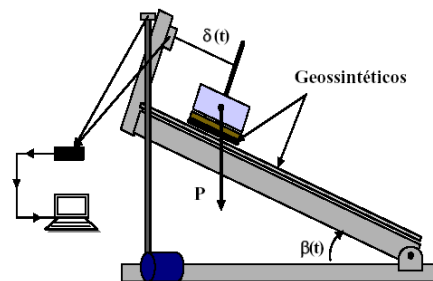


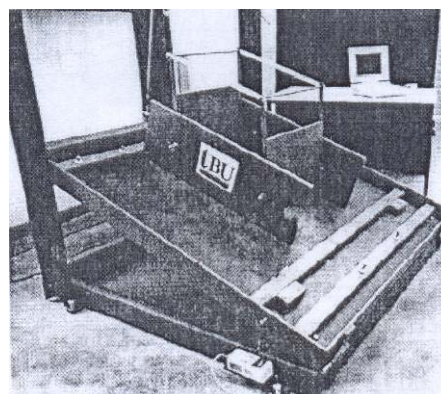
Figura 26 - Equipamento de rampa reportado por Girard *et al.* (1990).



(a) vista esquemática.



(b) Configuração para ensaios geossintético-geossintético.



(c) Configuração com faces inclinadas para solo-geossintético

Figura 27 - Equipamento de rampa reportado por Gourc *et al.* (1996).

Izgin (1997) propõe um aparelho com dimensões de rampa de 600mm de comprimento x 490mm de largura x 25mm de espessura (Figura 28). Pode ensaiar amostras de 60x60mm, 200x200mm e 300x300mm. Para as amostras de menores dimensões, o confinamento pode atingir 50kPa. Para as amostras maiores, as tensões confinantes são restritas a 25kPa. O sistema de inclinação de rampa é composto por um compressor de ar comprimido que aciona um sistema hidráulico. As velocidades de inclinação que podem ser aplicadas por este sistema variam de 1 a 6,5°/s (Yzgin e Wasti, 1998). Não há informações sobre os sistemas de medição de deslocamento horizontal e de inclinação.

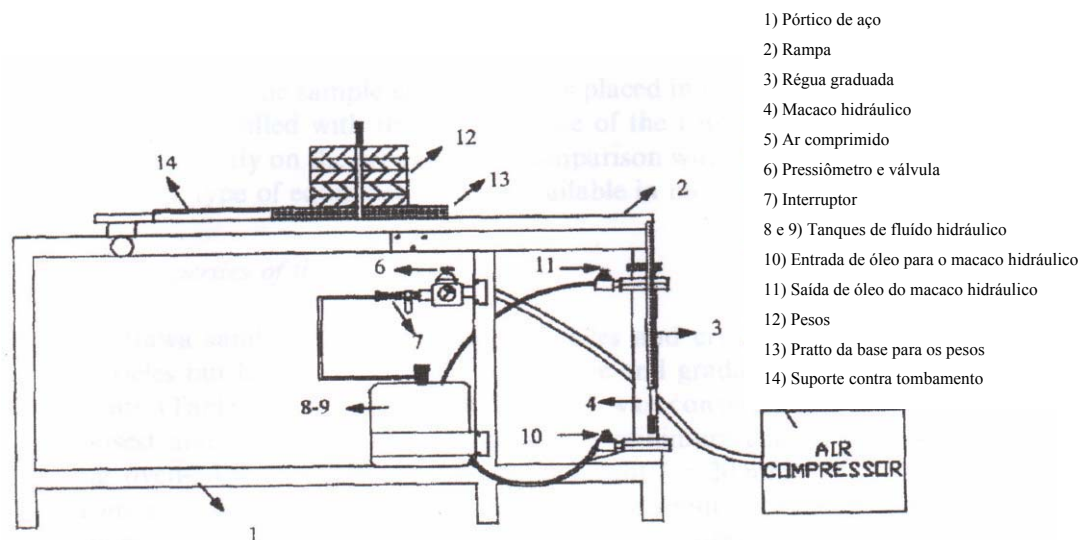
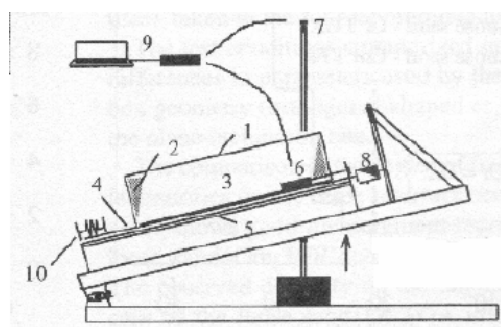


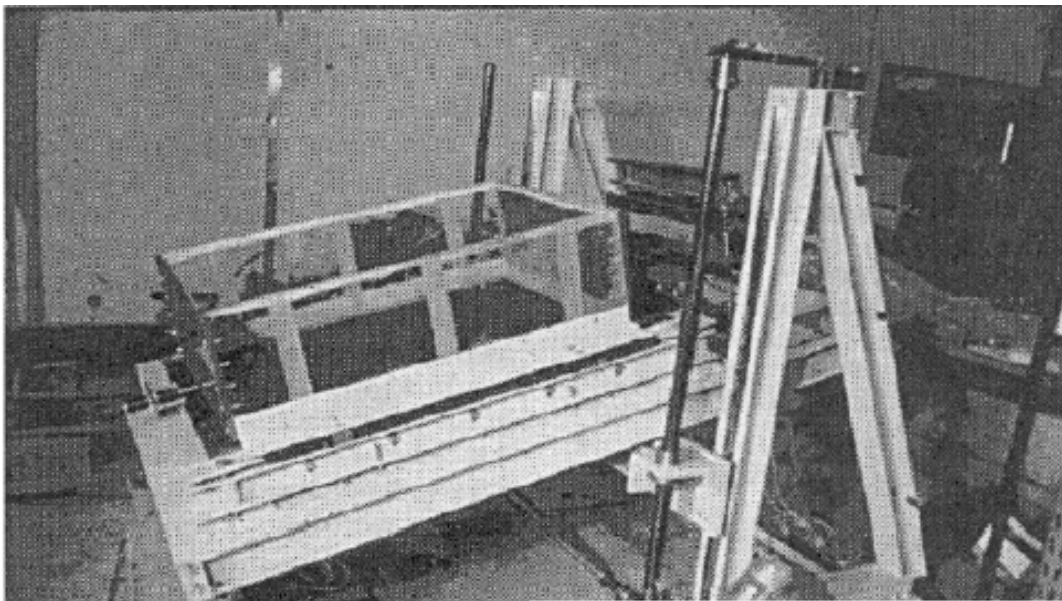
Figura 28 - Equipamento de rampa reportado por Izgin e Wasti (1998).

Lalaratokotoson *et al.* (1999) descrevem um equipamento de rampa para a determinação de parâmetros de interface. O equipamento consiste de um suporte rígido onde fica posicionado o geossintético, que é ancorado na extremidade ascendente da rampa. A caixa de teste tem as dimensões de 100cm x 70cm x 30cm e possui a opção de inclinar as suas faces, para minimizar a não uniformidade da distribuição da tensão normal. A medição dos deslocamentos horizontais da caixa e da inclinação é feita através de sensores e transmitida para um sistema de aquisição de dados. As principais características do equipamento são apresentadas na Figura 29.



(a) Vista esquemática.

- 1 - Caixa de teste (1 x 0,7 x 0,3 m³)
- 2 - Face da caixa inclinada
- 3 - Solo
- 4 - Geossintético
- 5 - Suporte Rígido
- 6 - Sensor deslocamento
- 7 - Sensor inclinação
- 8 - Ancoragem geossintético
- 9 - Aquisição dados
- 10 - Sensor de força



(b) Detalhe.

Figura 29 - Equipamento de rampa reportado por Lalarakotoson *et al.* (1999).

O equipamento reportado por Lima Jr. (2000), ilustrado na Figura 30 apresenta dimensões internas da caixa de confinamento de solo iguais 1920mm de comprimento, 250mm de altura e 470mm de largura. As camadas de geossintéticos podem ser ancoradas na extremidade ascendente da rampa e células de carga de tração permitem a medição das cargas de tração nas extremidades fixas dos geossintéticos. Até três camadas de geossintéticos podem ser ensaiadas simultaneamente. Deflectômetros fornecem os deslocamentos relativos entre a caixa da amostra e a rampa. Um sistema de carga vertical, consistindo de pesos de concreto, permite a aplicação de sobrecargas sobre a amostra de solo de, no máximo, 6kPa.



Figura 30 - Equipamento da Universidade de Brasília (Lima Jr., 2000).

Lopes (2001) construiu um equipamento capaz de realizar o ensaio de rampa de duas formas distintas. Na primeira o geossintético é fixado sobre uma base rígida e lisa e, na segunda, é sobreposto ao solo que preenche uma caixa inferior (Figura 31).

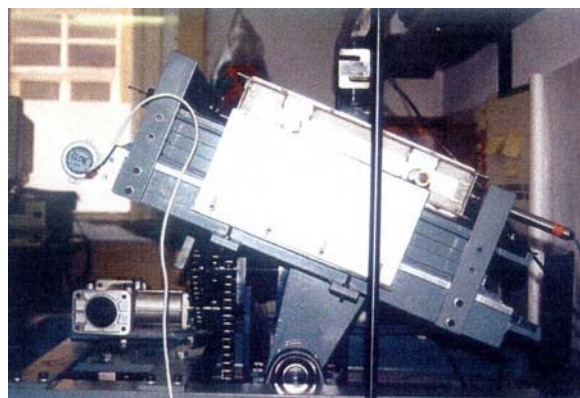


Figura 31 - Equipamento da Universidade do Porto (Lopes, 2001).

O equipamento apresenta uma base rígida e lisa com 0,62m de comprimento, 0,43m de largura e 0,010m de espessura, onde se assenta o geossintético na primeira configuração de ensaio. Para a segunda configuração,

utiliza-se uma caixa inferior rígida com dimensões internas de 0,51m de comprimento, 0,35m de largura e 0,08m de altura, preenchida por solo no qual assenta-se o geossintético. A caixa superior rígida tem dimensões internas de 0,30m de comprimento, 0,30m de largura e 0,08m de altura.

Este equipamento possui um sistema eletro-mecânico que permite que a base rígida seja inclinada com uma velocidade constante de 0,5°/min. Um sistema de segurança desliga automaticamente o equipamento quando a caixa superior excede 0,05m de deslocamento.

Os deslocamentos relativos da caixa superior e a inclinação da rampa são medidos por um transdutor de deslocamento e um inclinômetro elétricos, respectivamente. A tensão de confinamento é aplicada por um sistema análogo ao do ensaio cisalhamento direto convencional, composto por um pendural fixo a uma célula de carga.

Briançon *et al.* (2002) propõem um equipamento de rampa composto por duas caixas de ensaio (Figura 32). A inferior tem dimensões de 2,0m x 1,2m x 0,3m e a superior 1,0m x 1,0m x 0,5m. Ambas podem ser preenchidas com solo e são capazes de ensaiar amostras de grandes dimensões (1m x 1m). Os geossintéticos são colocados entre as duas caixas. Dependendo do tipo de interface ensaiada, os geossintéticos podem ser fixados na caixa superior ou ancorados através de garras na caixa inferior. As garras são conectadas a células de carga para medição da força aplicada na amostra. O espaçamento entre as caixas pode ser ajustado, permitindo o ensaio de materiais de maior espessura como os geocompostos.



Figura 32 - Equipamento reportado por Briançon *et al* (2002).

O sistema de içamento é composto por um motor elétrico. A velocidade pode ser ajustada, variando de 0,5 a 3,5°/min. A monitoração do ensaio é realizada através de medidores eletrônicos de deslocamento, células de carga e inclinômetros.

Najero (2003) apresenta um equipamento de rampa, desenvolvido para determinar o ângulo de atrito de interfaces geossintético-geossintético (Figura 33). O equipamento é composto por duas placas metálicas com dimensões de 8,6cm por 23,8cm. A placa inferior é fixada à base da estrutura. O sistema de inclinação da rampa é composto por uma barra rosqueada que tem uma de suas extremidades presa na placa superior e é controlado por uma manivela na outra extremidade. O confinamento é obtido através de blocos de concreto e a máxima tensão aplicada é de 2kPa. A velocidade de inclinação é da ordem de 5°/min. A inclinação da rampa é monitorada por um medidor de ângulo de base magnética.

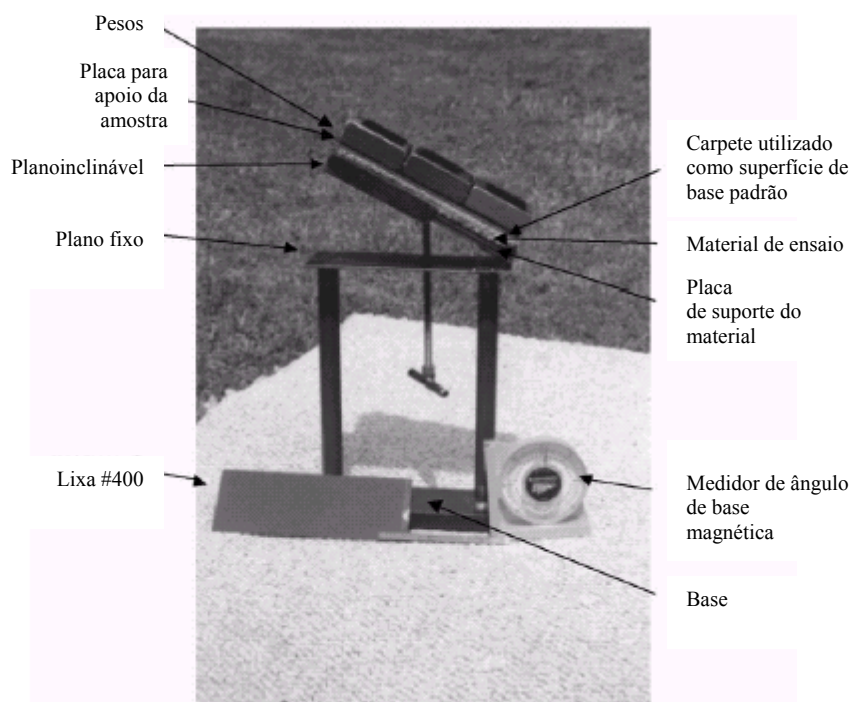


Figura 33 - Equipamento de rampa reportado por Najero (2003).

Aguiar (2003) apresenta o equipamento de rampa da PUC-Rio, composto por duas caixas de ensaio (Figura 34). A inferior tem dimensões de 120cm x 100cm x 5cm e a superior 100cm x 100cm x 5cm. Ambas as caixas podem ser

preenchidas com solo e são capazes de ensaiar amostras de grandes dimensões (100 x 100cm).

Os deslocamentos da caixa superior são monitorados empregando-se de uma régua metálica e os ângulos de rampa podem ser monitorados por dois tipos de medidores de ângulo, de base magnética e transferidor com pêndulo acoplado. As tensões de confinamento são aplicadas através de placas de concreto. A inclinação da rampa é feita por meio de um sistema de roldana e correntes fixo no centro do pórtico, ancorando-se a corrente do sistema na base da rampa.

Este equipamento sofreu algumas modificações, sendo aprimorados os sistemas de confinamento, deslocamento horizontal e fixação do geossintético (Rezende, 2005).

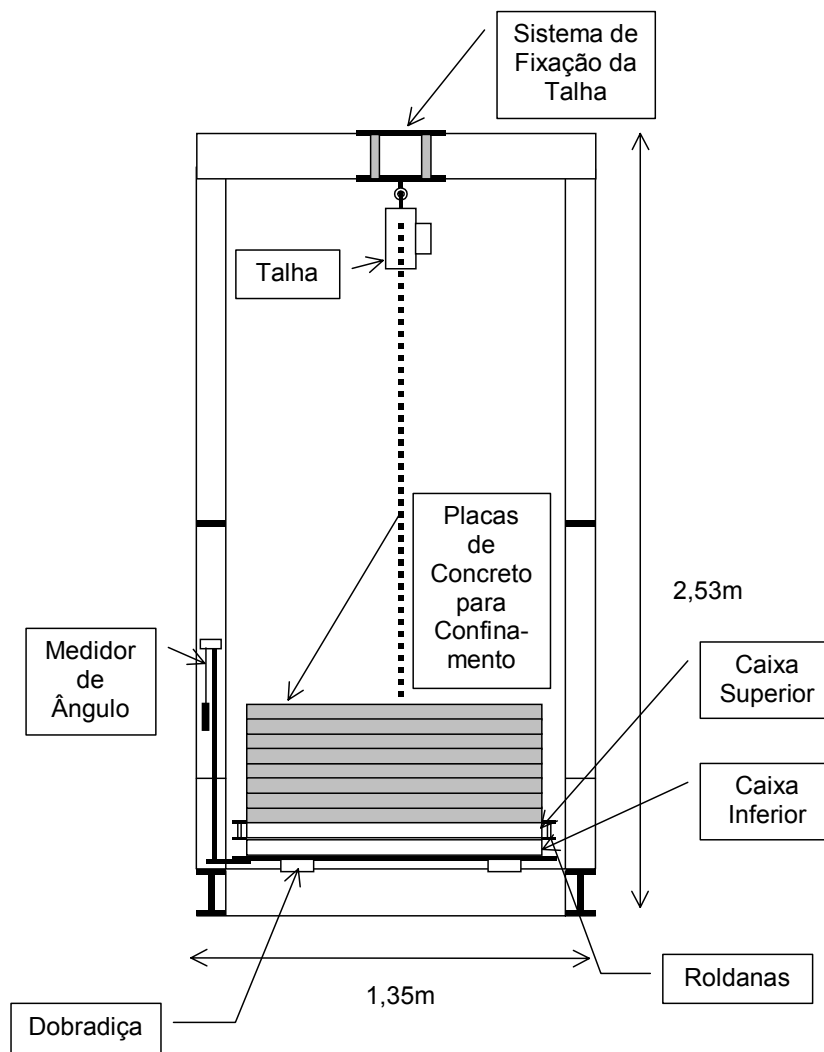


Figura 34 - Equipamento de rampa da PUC-Rio (Aguiar, 2003).

3.2.3.**Fatores de influência dos ensaios de rampa associados ao equipamento***Influência da relação comprimento vs altura*

Melo *et al.* (2003) reportaram que, apesar de simples, o ensaio apresenta algumas limitações. A primeira é associada à variação da tensão normal com a inclinação da rampa e a segunda corresponde à forma de distribuição da tensão normal. Em geral, admite-se que a distribuição da tensão normal é uniforme ao longo da superfície de contato solo-geossintético, o que não ocorre na prática (Figura 22).

Palmeira *et al.* (2002) aproxima a distribuição das tensões a uma forma trapezoidal e seus valores máximo e mínimo são obtidos pelas seguintes relações:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma} = 4 - \frac{6x}{L} \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma} = \frac{6x}{L} - 2 \quad (8)$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\cos[\alpha + \tan^{-1}(h/L)]}{2\cos\alpha} \times [1 + (\frac{h}{L})^2]^{1/2} \quad (9)$$

onde:

σ_{\max} = tensão normal máxima;

σ_{\min} = tensão normal mínima;

σ = tensão normal média;

x = distância entre a extremidade inferior do bloco de solo e o ponto de aplicação da força normal na interface;

α = ângulo de inclinação da rampa;

h = altura da amostra de solo;

L = comprimento da base da amostra de solo;

W = peso da amostra.

As Equações 7 a 9 indicam que as dimensões da amostra influenciam significativamente nos valores da tensão máxima e mínima atuantes, sendo fatores importantes em equipamentos de pequenas dimensões.

Melo *et al.* (2003) realizaram uma série de simulações numéricas para analisar a influência do tamanho da amostra na distribuição de tensões. A Figura 35, baseada em Palmeira *et al.* (2002), apresenta a variação da tensão normal vs comprimento normalizado ($L = 0,5, 2$ e 10m) para inclinações de 15° e 25° .

A comparação entre os resultados teóricos (Equações 7 a 9) e os resultados obtidos pela simulação numérica mostra uma boa concordância. Porém, deve-se ressaltar que, para comprimentos de interface igual a $0,5\text{m}$, a diferença entre valores das tensões máxima e mínima pode chegar a cinco vezes.

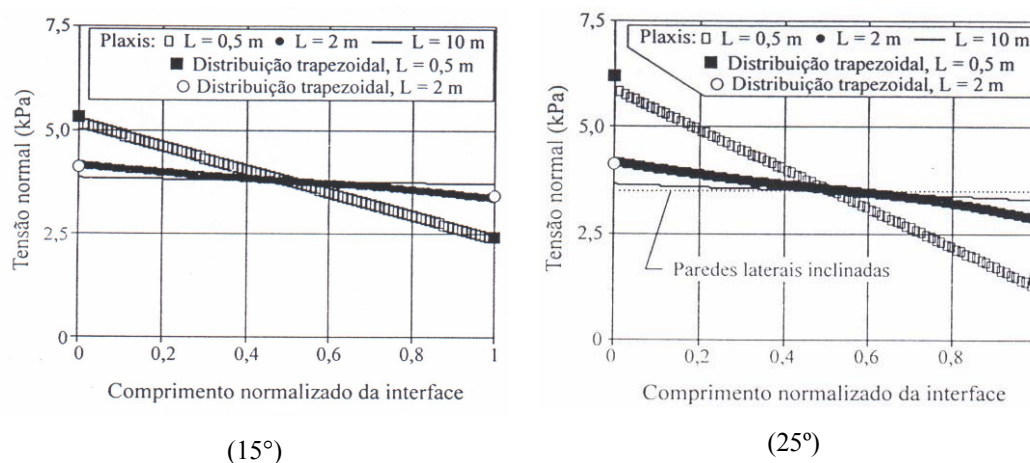


Figura 35 - Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado (Melo *et al.*, 2003).

Gourc *et al.* (1996) sugerem a utilização de caixas de ensaio com faces inclinadas para a uniformização das tensões no momento da ruptura da interface. Uma alternativa menos complexa é proposta por Melo *et al.* (2003) que recomendam a utilização de caixas de ensaios com razão comprimento-altura elevada.

Influência das dimensões do equipamento

Estudos referentes à influência das dimensões das caixas de ensaios foram feitos por Izgin e Wasti (1998). Nos ensaios foram usados dois solos granulares

(areia e brita) e quatro tipos de geomembranas (duas com face lisa e duas com face rugosa). Três configurações de ensaios foram utilizadas (caixas quadradas com dimensões iguais a $60 \times 60\text{mm}^2$, $200 \times 200\text{mm}^2$ e $300 \times 300\text{mm}^2$ com tensões normais variando de 5 a 50kPa. Os resultados são apresentados na Tabela 4, onde o valor entre parênteses é o ângulo de atrito de interface em graus e os valores entre colchetes são os valores dos ângulos (em graus) para os quais ocorreram o deslizamento para a menor e maior tensão normal usada no ensaio.

Tabela 4 - Ângulos de atrito de interface dos ensaios de rampa (Izgin e Wasti, 1998)

Solo	Área Contato (mm ²)	Geomembrana			
		lisa 1 GL1	lisa 2 GL2	rugosa 1 GR1	rugosa 2 GR2
areia	60 x 60	(16,5) [18; 17]	(18,5) [20; 19]	(28) [29; 28]	(24) [26; 24]
	200 x 200	18,5 [21; 19]	~ ~	~ ~	26 [26; 26]
	300 x 300	19 [20; 19]	~ ~	~ ~	26 [26; 26]
	60 x 60	(23,5) [26; 23]	(24) [25; 24]	(30) [33; 30]	(27,5) [31; 28]
	200 x 200	(26,5) [26; 26]	~ ~	~ ~	(30,5) [32; 31]
	300 x 300	(25) [25; 25]	~ ~	~ ~	(31,5) [31; 32]

Os autores concluíram que a apresentação dos resultados em termos de curvas tensão normal x tensão cisalhante fornecem retas que passam aproximadamente pela origem, aonde poder-se-ia negligenciar a pequena adesão de 0,5kPa (Figura 36).

Izgin e Wasti (1998) também observaram que o aumento da área de contato provoca um aumento do ângulo de interface médio de cerca de três graus da menor para a maior área (Figura 37).

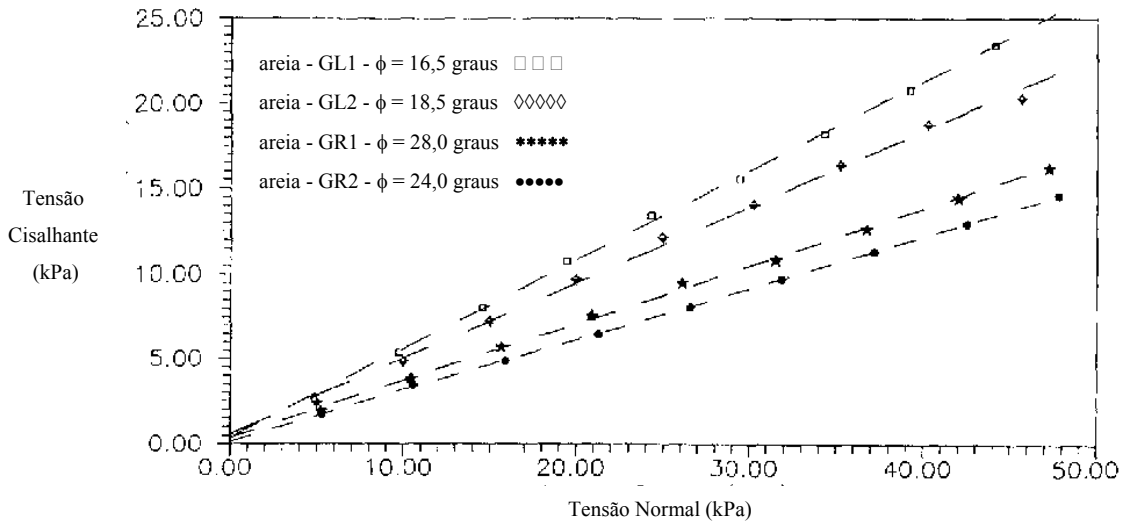


Figura 36 - Envolvórias de resistência dos ensaios de rampa para interfaces areia-geomembranas para uma área de contato de 60x60mm (Izgin e Wasti, 1998).

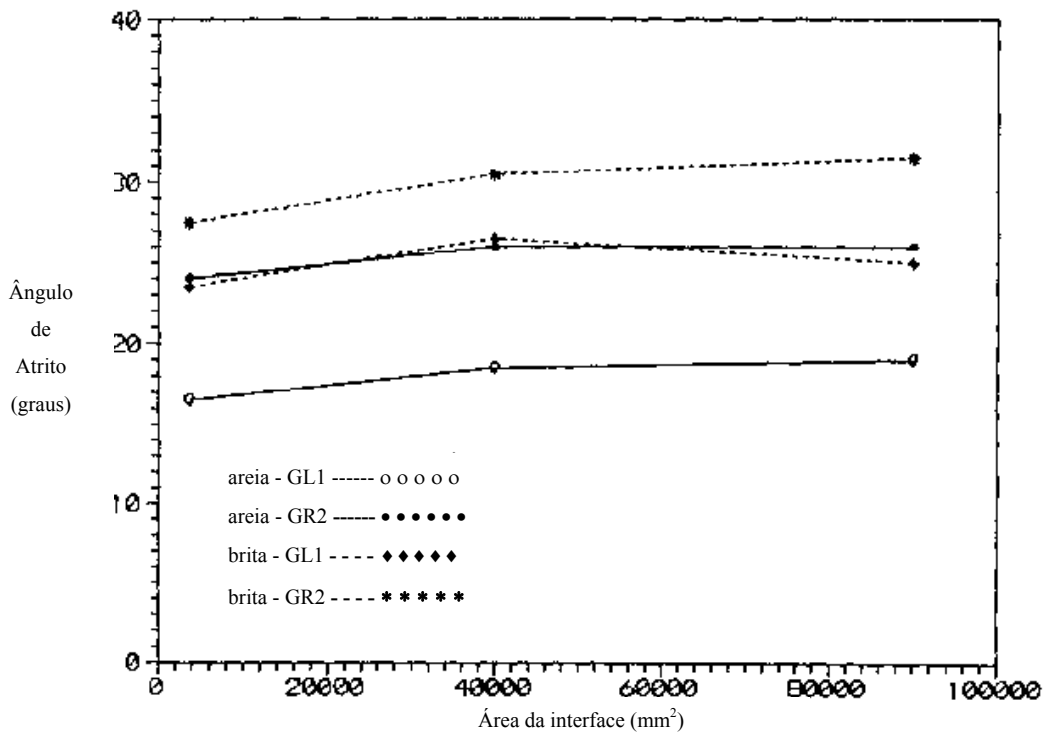


Figura 37 - Variação do ângulo de atrito de interface em função da variação da área de contato (Izgin e Wasti, 1998).

Influência da presença da base rígida

A norma ISO 12957-2 faculta duas metodologias diferentes de ensaio. Na primeira o geossintético pode estar apoiado sobre uma camada de solo, contido

em uma caixa inferior, e na segunda ele pode estar apoiado sobre uma base rígida. Da mesma forma que no ensaio de cisalhamento direto, a presença ou a ausência desta camada de solo pode influenciar os resultados de ensaios com geogrelhas.

Para averiguar esta condição de contorno, Lopes (2001) realizou uma série de ensaios com duas geogrelhas (uniaxial e biaxial) e as duas metodologias sugeridas pela norma: base rígida (1) e caixa inferior com solo (2). Os resultados são apresentados na Figura 38 em termos de deslocamento (mm) x ângulo de rampa (graus).

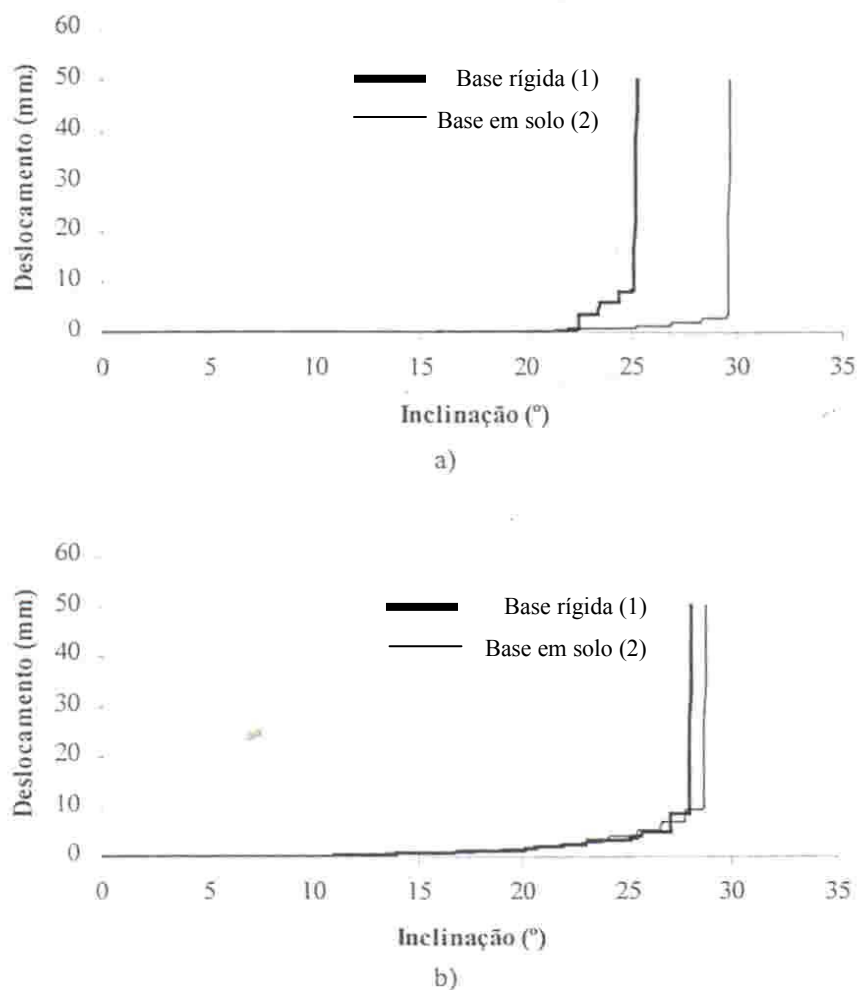


Figura 38 - Influência da presença de base rígida (1) e base solo (2) no ensaio de rampa com geogrelhas: (a) uniaxial e (b) biaxial (Lopes, 2001).

A resistência ao cisalhamento da interface solo-geogrelha, segundo Alfaro *et al.* (1995) é função de duas parcelas: atrito solo - geogrelha (membros longitudinais e transversais) e atrito solo-solo (entre as áreas abertas) (Figura 39). No caso (1), com base rígida, a parcela devida ao atrito nas áreas abertas é

reduzida, pois o atrito solo-material da base rígida (no caso uma placa de aço polida) é consideravelmente menor do que o atrito solo-solo. Observa-se que o efeito no resultado da interface com geogrelha uniaxial é considerável, provocando uma redução de cerca de 5° no ângulo de rampa. Já na interface com a geogrelha biaxial a redução foi menor, cerca de 2°. A diferença de comportamento está ligada à dimensão da área aberta das geogrelhas, sendo que a área aberta da geogrelha uniaxial é consideravelmente maior.

O uso da base rígida pode interferir nos resultados de interfaces solo-geogrelha por desprezar a parcela de atrito solo-solo. Sendo assim não se recomenda a utilização de uma base rígida neste caso.

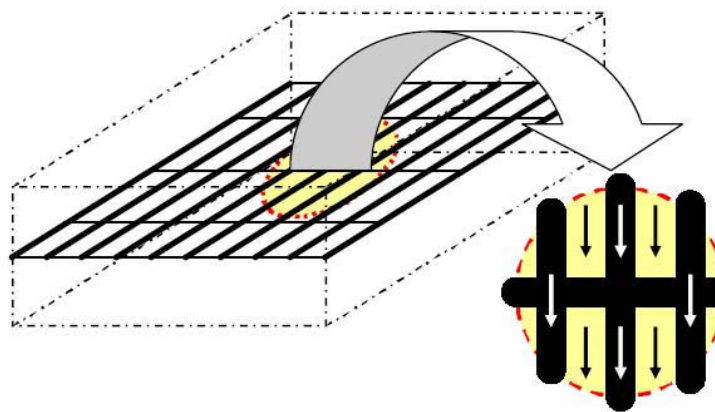


Figura 39 - Contribuição do atrito solo-solo (setas pretas) e atrito solo-geogrelha (setas brancas).

Influência da velocidade de basculamento da rampa

Yzgin e Wasti (1998) estudaram a influência da variação da velocidade de basculamento da rampa nos resultados dos ensaios. Os autores reportam que utilizaram velocidades de 1,00; 1,65 e 6,50°/s, não obtendo variação significativa no ângulo de ruptura de rampa obtido. Desta forma os autores sugerem uma velocidade de ensaio da ordem de 6°/s.

3.2.4. Fatores de influência dos ensaios de Rampa associados aos materiais

Tensão confinante

A influência da tensão confinante em ensaios de rampa foi estudada por vários pesquisadores (Waste e Özduzgun, 2001; Lopes, 2001; Aguiar, 2003; Rezende, 2005).

Waste e Özduzgun (2001) realizaram ensaios de cisalhamento direto e rampa utilizando o equipamento reportado por Izgin e Wasti (1998). Nos seus ensaios foram utilizadas duas geomembranas de PEAD (lisa e rugosa) e um geotêxtil não-tecido agulhado. Os resultados indicaram que o aumento da tensão confinante afeta muito mais os resultados das interfaces geotêxtil-geomembrana rugoso do que geotêxtil-geomembrana lisa (Figura 40). Também ficou demonstrado que a utilização de parâmetros de interface obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto sob ação de baixas tensões confinantes pode levar a erros contra a segurança.

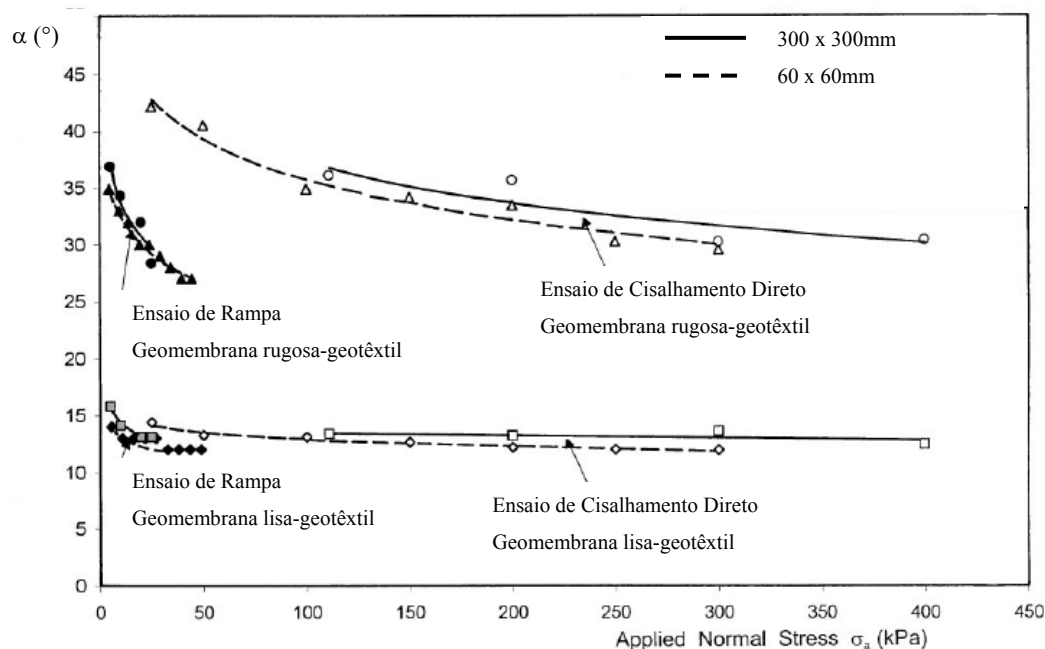


Figura 40 - Influência da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de interface (Wasti e Özduzgun, 2001).

Lopes (2001) estudou a influência da tensão confinante em interfaces solo-geossintético. Neste estudos empregou-se o equipamento de ensaio de rampa da

Universidade do Porto (Figura 31), uma série de interfaces, três tensões de confinamento diferentes 5, 10 e 25kPa (tensão normal inicial) e um solo arenoso. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Observando os resultados da Tabela 5, concluí-se que as interfaces geomembrana lisa-areia e geogrelha uniaxial-areia apresentam a menor redução de ângulo de atrito, diferindo das interfaces geomembrana rugosa-areia e geogrelha biaxial-areia que se mostram mais suscetíveis à variação da tensão normal. No caso desta última interface, o comportamento pode ser explicado pela geometria da geogrelha e pela metodologia de ensaio que adotou uma camada de solo na caixa inferior.

Tabela 5 - Influência da tensão de confinamento no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001)

Geossintético	Tensão de Confinamento			% de Redução (*)
	Inicial (kPa)			
	5	10	25	
	Ângulo de atrito na interface (°)			
Geomembrana lisa	21,2	21,4	20,8	2,2
Geomembrana rugosa	33,0	31,2	30,2	8,4
Geotêxtil tecido	32,2	30,5	29,7	7,9
Geotêxtil não-tecido termossoldado	32,3	31,7	30,5	5,4
Geotêxtil não-tecido agulhado	33,1	32,2	30,9	6,6
Geogrelha uniaxial	26,8	27,6	26,5	1,1
Geogrelha biaxial	31,3	30,1	28,7	8,2

(*) relação entre o ângulo de atrito de interface solo-geossintético para as tensões de confinamento iniciais de 5 e 25kPa.

Ainda em relação a estes ensaios, Lopes (2001) ressalta que, para ensaios de interface com movimento ao longo de um plano horizontal (arrancamento e cisalhamento direto), a resistência das interfaces solo-geossintético aumenta com a tensão de confinamento. Entretanto, para movimento ao longo de um plano inclinado, há uma redução da resistência das interfaces com o aumento da tensão de confinamento, em virtude do acréscimo simultâneo da tangencial instabilizadora.

Aguiar (2003) e Rezende (2005) também avaliaram a influência da tensão confinante utilizando o equipamento da PUC-Rio. Os autores utilizaram três solos (areia, silte e pedregulho) e três geossintéticos (geogrelha, geomembrana e geotêxtil não-tecido). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6. Observa-se, de uma forma geral, que em todas as interfaces ensaiadas há uma diminuição do ângulo de ruptura de rampa com o aumento da tensão confinante, sendo que a única exceção é a interface silte-geogrelha. Das interfaces apresentadas a que mais sofre com o efeito da tensão confinante é a areia fofa-geogrelha, com uma redução de 5° no ângulo de rampa, o que equivale a uma porcentagem de redução de 15,6%. Já a interface silte-geogrelha não sofreu qualquer influência.

Tabela 6 - Influência da tensão confinante nos ângulos de rampa (Aguiar, 2003 e Rezende, 2005)

Geossintéticos	Solo	σ_n (kPa)						Redução em Graus	% de redução
		1,0	2,1	3,2	4,5	5,1	8,2		
		α (graus)							
Geogrelha	Ar 45	~	32	30	~	27	~	5	15,6
	Ar 90	~	33	33	~	30	~	3	9,1
	Si 100	43	~	~	44	~	43	0	0,0
	Br 35	~	37	34	~	34	~	3	8,1
Geomembrana	Ar 45	~	24	24	~	23	~	1	4,2
	Ar 90	~	26	25	~	24	~	2	7,7
	Si 100	33	~	~	32	~	31	2	7,7
	Br 35	~	32	31	~	29	~	3	9,4

Ar - areia; Si - silte; Br - brita; 35 - densidade relativa de 35%; 45 - densidade relativa de 45%; 90 - densidade relativa de 90%; 100 - grau de compactação de 100%.

Tipo de geossintético

A estrutura dos geossintéticos condiciona os resultados dos ensaios de rampa. Desta forma, alguns pesquisadores procuraram avaliar a influência destes materiais na resistência da interface solo-geossintético.

Mello (2001) concluiu em seu trabalho que o ângulo de atrito da interface está diretamente ligado à rugosidade da interface do geossintético. O autor

realizou uma campanha de ensaios envolvendo interfaces areia-geomembrana e areia-geotêxtil (Figura 41).

Nos ensaios, os menores valores de ângulo de atrito observados foram para interfaces entre geomembranas lisas (PEAD e PVC) e areia. Os geossintéticos com superfícies mais rugosas, como o geotêxtil não-tecido e geomembrana-texturizada resultaram em valores maiores de ângulos de atrito da interface. A interface entre geotêxtil tecido e areia apresentou um valor intermediário do ângulo de atrito da interface.

Lopes (2001) realizou uma série de ensaios de rampa empregando uma areia e um grupo de geossintéticos (geomembranas lisas e rugosas, geotêxteis tecidos e não tecidos e geogrelhas uniaxial e biaxial). Nestes ensaios foi utilizada a configuração com base rígida, a qual consiste em assentar o geossintético sobre uma base rígida e lisa.

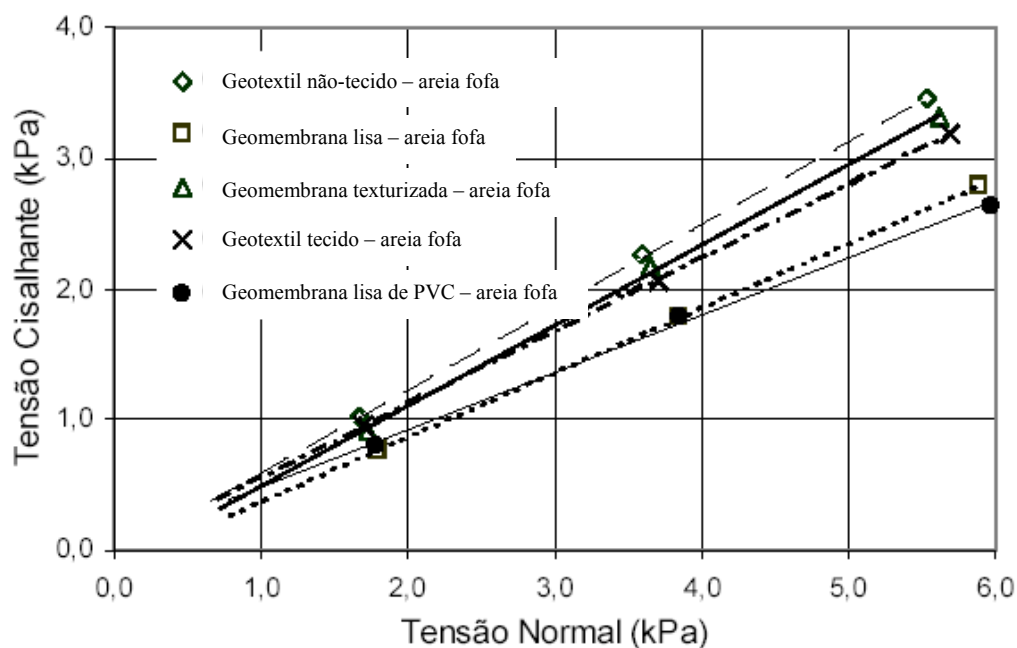


Figura 41 - Comparação entre as envoltórias de ruptura de diversas interfaces (Mello, 2001).

Lopes (2001) constatou que os geossintéticos com estrutura mais lisa (geomembrana lisa) são os que possuem os menores valores de resistência na interface. Em contrapartida, o geossintético com superfície lateral mais rugosa (geotêxtil não tecido agulhado) é o que apresenta o valor mais elevado de ângulo

de atrito. Entre os geotêxteis, verificou-se que o geotêxtil tecido é o que possui menor resistência na interface, em virtude da sua superfície ser formada por filamentos dispostos regularmente, tornando-a menos rugosa que a dos não tecidos. A resistência da interface solo-geomembrana rugosa é idêntica à das interfaces solo-geotêxtil, corroborando a utilização freqüente das geomembranas rugosas em taludes. No caso das geogrelhas, as biaxiais apresentam maior resistência que as uniaxiais.

Aguiar (2003) também realizou uma série de ensaios de rampa para avaliar a influência do tipo de geossintético na resistência da interface solo-geossintético. Em seus estudos utilizou um solo silto-argiloso, e três geossintéticos (uma geomembrana de PVC texturizada em uma das faces, um geotêxtil não tecido e uma geogrelha uniaxial). Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 7 e correspondem à adesão (a) e ângulo de atrito da interface-solo-geossintético (ϕ_{sg}) e ainda as eficiências em termos de coesão (E_c) e ângulo de atrito (E_ϕ). Da mesma forma que Mello (2001) e Lopes (2001), as superfícies que apresentam maior rugosidade são as mais resistentes.

Tabela 7 - Influência do tipo de geossintético nos resultados dos ensaios de rampa (Aguiar, 2003)

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
solo-geotêxtil	0,16	41,4	0,64	0,94
solo-geogrelha	0,22	43,7	0,88	1,02
solo-geomembrana	0,17	35,0	0,68	0,81

A influência do tipo de geossintético na resistência da interface solo-geossintético também foi analisada por Rezende (2005). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos pela autora, onde se representa a densidade relativa do solo (45 e 90%), $\Delta l_{m\acute{a}x}$ é o deslocamento máximo da caixa na ruptura, α é o ângulo de rampa na ruptura, σ é a tensão normal e τ é a tensão cisalhante.

A autora conclui que para uma mesma tensão confinante e diferentes densidades relativas, há uma diferença considerável entre o ângulo de rampa na ruptura quando se muda o geossintético ensaiado. A explicação para isso está relacionada a estrutura do geossintético. A geomembrana apresenta sua face superior lisa não propiciando o embricamento dos grãos do solo com o material,

diferentemente do que ocorre com a geogrelha. Este geossintético apresenta uma área aberta elevada propiciando um elevado contato solo-solo, além de apresentar uma superfície muito mais rugosa. É interessante ressaltar que a resistência da interface solo-geogrelha depende das duas parcelas, como demonstrado na Figura 39.

Tabela 8 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para uma tensão confinante de 3,2kPa (Rezende, 2005)

Geossintético	Dr (%)	$\Delta l_{m\acute{a}x}$ (mm)	α (graus)	Tensão na Ruptura		
				σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ
Geogrelha	45	7,00	30	2,8	1,8	0,62
	90	2,00	33	2,8	1,9	0,70
Geomembrana	45	4,50	24	3,0	1,4	0,48
	90	0,75	25	3,7	1,8	0,49

De uma forma geral os autores concordam que a rugosidade da interface é um fator de influência significativa no comportamento da resistência da interface solo-geossintético.

Tipo de solo

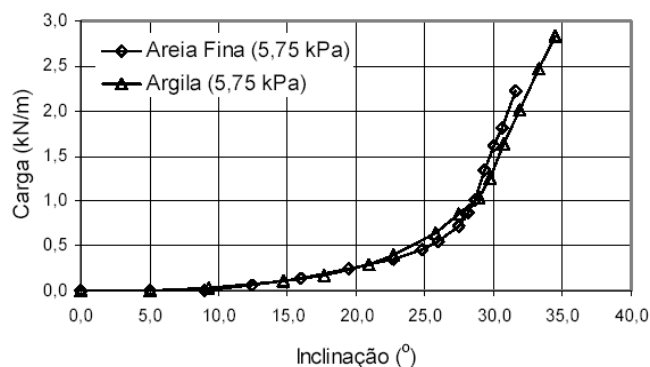
Lopes (2001) analisou a influência do tipo de solo empregando duas areias com curvas granulométricas diferentes e uma série de interfaces solo-geossintético (Tabela 9).

Constatou-se que o aumento da granulometria do solo influenciou mais nos resultados dos geossintéticos com superfície lisa (geomembrana lisa e geotêxtil tecido) devido ao aumento da superfície de contato entre o solo e o geossintético. Seu efeito é menos evidente nos geossintéticos com superfície rugosa, em virtude da rugosidade, por si só, aumentar a superfície de contato. No caso das geogrelhas, o aumento da resistência é mais marcante na biaxial, pelo fato de possuir uma área aberta menor. Porém, segundo a autora, independentemente da granulometria da areia, as interfaces com geomembrana lisa e geogrelha uniaxial continuam sendo as menos resistentes.

Tabela 9 - Influência da granulometria do solo nos resultados dos ensaios de rampa (Lopes, 2001)

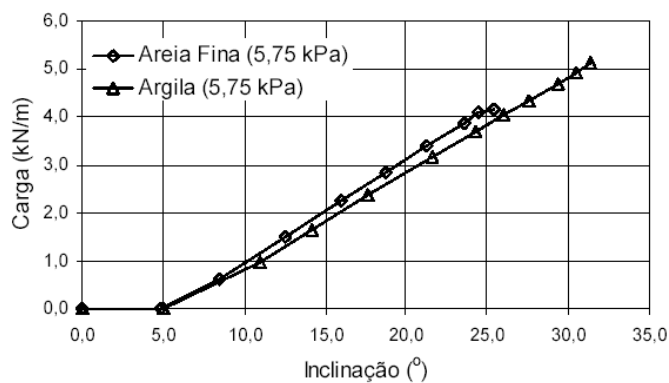
Geossintético	Areia 1	Areia 2	% de aumento
	($D_{\text{máx}}=2,00\text{mm}$)	($D_{\text{máx}}=9,54\text{mm}$)	
Ângulo de atrito na interface (°)			
Geomembrana lisa	21,4	24,5	14,6
Geomembrana rugosa	31,2	32,9	5,50
Geotêxtil tecido	30,5	33,6	10,2
Geotêxtil não tecido termossoldado	31,7	32,3	2,10
Geotêxtil não tecido agulhado	32,2	32,9	2,10
Geogrelha uniaxial	27,6	29,5	6,60
Geogrelha biaxial	30,1	33,0	9,50

Mello (2001) executou ensaios de rampa em um solo arenoso fino e um argiloso para avaliar a influência do tipo de solo na resistência de interfaces solo-geossintético. Nos seus estudos utilizou geotêxteis não-tecidos, geomembranas lisas e geomembranas rugosas. Nos ensaios foram mensuradas as cargas desenvolvidas nos geossintéticos por meio de uma célula de carga. O autor observou que as cargas medidas foram semelhantes para os dois solos, ocorrendo apenas, diferenças na carga final corresponde à ruptura da interface (Figura 42).

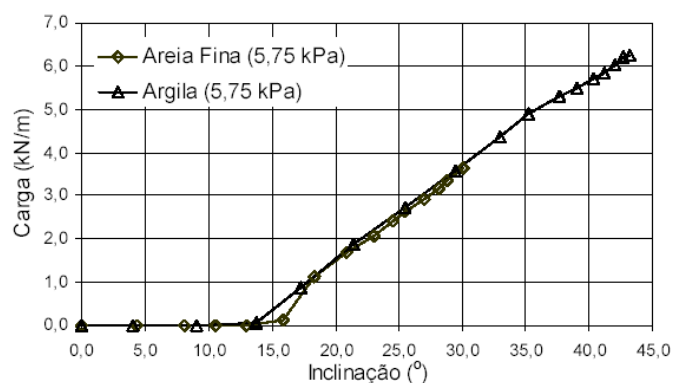


(a)

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).



(b)

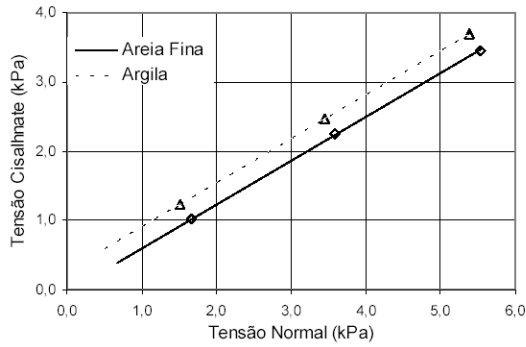


(c)

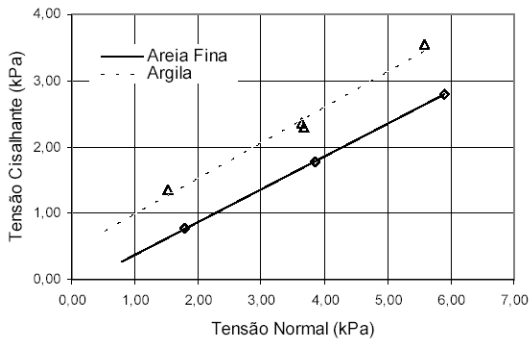
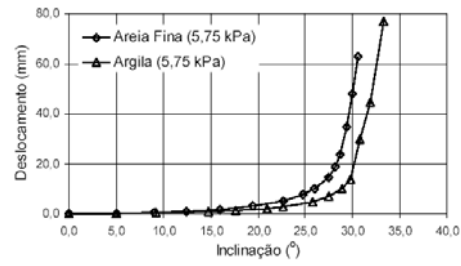
Figura 42 (cont.) - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido, (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).

Para o geotêxtil não-tecido, a variação da carga ocorre de forma não-linear ao contrário das interfaces com geomembrana, que apresentam relação: carga vs inclinação linear.

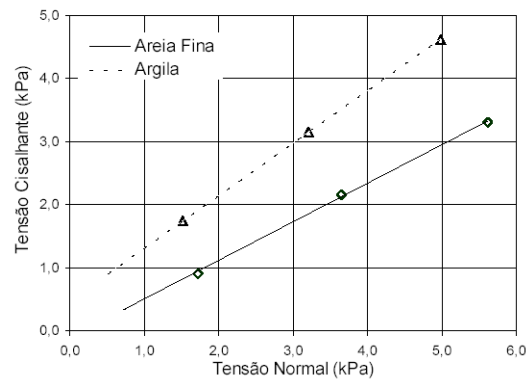
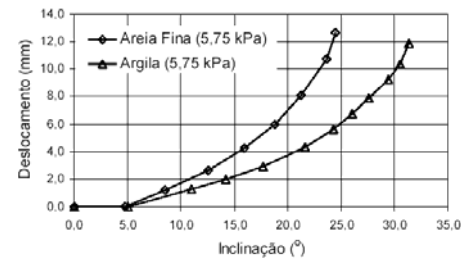
Mello (2001) também observou que os ângulos de atrito de interface são maiores para o solo argiloso (Figura 43). Uma explicação para isso pode estar no fato de que a areia foi preparada com compactação mediana ($D_r=57\%$), enquanto que a argila foi compactada com a energia equivalente a do Proctor Normal.



(a)



(b)



(c)

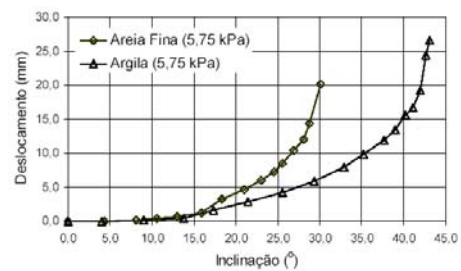


Figura 43 - Envolvórias de ruptura e variação dos deslocamentos para os dois tipos de solo e os geossintéticos: (a) geotêxtil não-tecido; (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001).

3.3. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é realizado em equipamentos tradicionais modificados ou em equipamentos especialmente construídos com caixas de ensaio maiores a fim de se evitar ou minimizar o efeito de escala.

Dois tipos de montagem são normalmente empregados (Figura 44). Na primeira situação o geossintético é assentado sobre uma camada de solo e na segunda ele é colocado sobre um suporte rígido. Durante o ensaio são medidos a força horizontal necessária para deslocar a parte superior da caixa de cisalhamento e os deslocamentos vertical e horizontal.

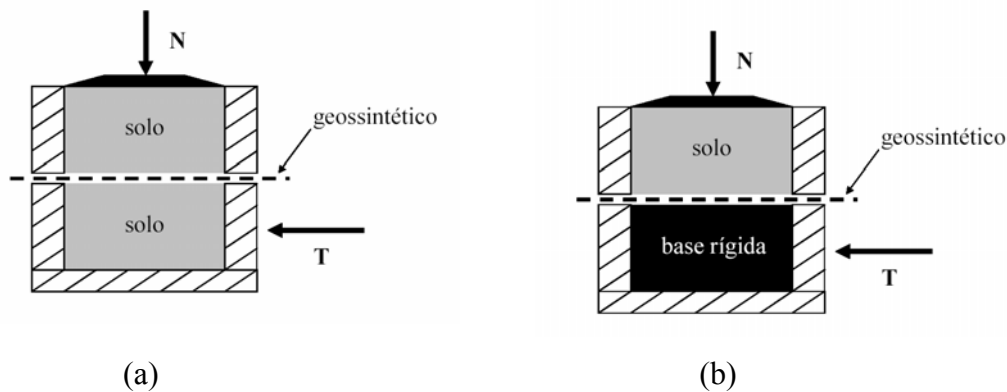


Figura 44 - Ensaio de cisalhamento direto: (a) geossintético entre duas camadas de solo e (b) geossintético colado em base rígida.

No ensaio convencional, a base rígida é utilizada na maioria dos testes executados em geotêxteis e geomembranas. Este procedimento representa convenientemente o mecanismo de interação por atrito, além de garantir que a interface coincida com a superfície de ruptura. No caso de duas caixas com solo, deve-se considerar o efeito do adensamento na fase inicial do ensaio, que pode mudar a posição do geossintético em relação à superfície de ruptura (Sieira, 2003).

No caso de geogrelhas recomenda-se a configuração de duas caixas, uma vez que, este tipo de geossintético apresenta elevadas porcentagens de áreas abertas e a resistência de interface solo-geogrelha é composta pelas parcelas de atrito ao longo do geossintético e atrito solo-solo entre as aberturas (Figura 39).

Os parâmetros de resistência (adesão a e ângulo de atrito solo-geossintético ϕ_{sg}) são obtidos da envoltória de resistência, resultante de uma série de ensaios, sob a ação de diferentes tensões normais (Figura 12).

O ensaio de cisalhamento direto não oferece grande dificuldade de interpretação. Além da execução simples, permite várias configurações de ensaio. No entanto, seus resultados podem ser influenciados por fatores, tais como:

posição relativa solo-geossintético, dimensões do equipamento, espessura da camada de solo, rugosidade do plano rígido e sistema para aplicação da pressão vertical.

3.3.1. Métodos para ensaio de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto são os mais utilizados devido à sua simplicidade. Na literatura são reportadas diferentes configurações de caixas (dimensões) e formas de fixação com o objetivo de facilitar as leituras das medidas de força e deslocamentos. Ingold (1990) apresenta algumas destas configurações esquematizadas na Figura 45:

(i) *Caixa de Cisalhamento Fixa*: neste ensaio, o geotêxtil (ou geomembrana) é montado sobre um bloco rígido, o qual é colocado na parte inferior da caixa. A metade superior é preenchida com solo, que é cisalhado sobre a geomembrana ou geotêxtil;

(ii) *Caixa de Cisalhamento Parcialmente Fixa*: o material sintético é disposto sobre o solo que preenche a metade inferior da caixa. Uma das extremidades do geotêxtil ou geomembrana é fixada na caixa e o solo contido na metade superior é cisalhado sobre a interface;

(iii) *Caixa de Cisalhamento Livre*: Este ensaio é similar à caixa parcialmente fixa, entretanto o material sintético está livre de ambos os lados;

(iv) *Caixa de Cisalhamento de Base Larga*: Similar à caixa fixa, entretanto a metade inferior da caixa tem uma dimensão plana mais larga que a metade superior contendo o solo. Apresenta como vantagem principal uma área de contato constante entre o solo e o material sintético;

(v) *Caixa de Cisalhamento de Base Central*: Apresenta princípio semelhante à caixa de base larga, contudo, a força de atrito mobilizada no geotêxtil ou

geomembrana é medida sobre uma área plana menor que a área plana do solo na parte superior da caixa de cisalhamento.

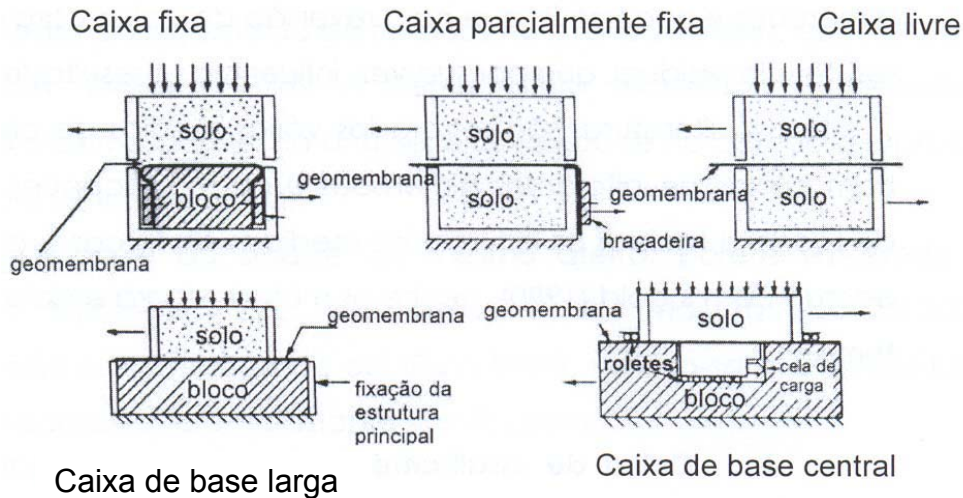


Figura 45 - Possíveis configurações do ensaio de cisalhamento direto (Ingold, 1990).

3.3.2. Equipamentos de ensaio de Cisalhamento Direto

Na bibliografia estão reportados equipamentos com área de contato solo-geossintético de até $1,0\text{m}^2$ e volume interno equivalente a 1m^3 . Variam, também, quanto ao arranjo das caixas de ensaio, sistemas de aplicação de força normal e cisalhante e sistema de leitura de grandezas.

O equipamento reportado por Koutsourais *et al.* (1991) pertence ao Georgia Institute of Technology (Figura 46). Ele consiste de um par de caixas de ensaio com dimensões internas de $305 \times 305 \times 51\text{mm}$, onde a caixa inferior é fixada a estrutura principal do equipamento e a superior, móvel, recebe os esforços cisalhantes.

O sistema de aplicação de força horizontal é do tipo pneumático e está ligado à caixa superior através de um pistão acoplado a uma célula de carga. A velocidade de deformação do pistão pode ser ajustada pra variar de $0,0025$ a $0,25\text{mm/min}$. A força vertical é aplicada perpendicularmente empregando-se de um sistema pneumático acoplado a uma célula de carga e move-se junto com a caixa superior de cisalhamento durante o ensaio. O limite de aplicação de força normal do sistema é desconhecido, mas estão reportadas tensões confinantes de até 62kPa .

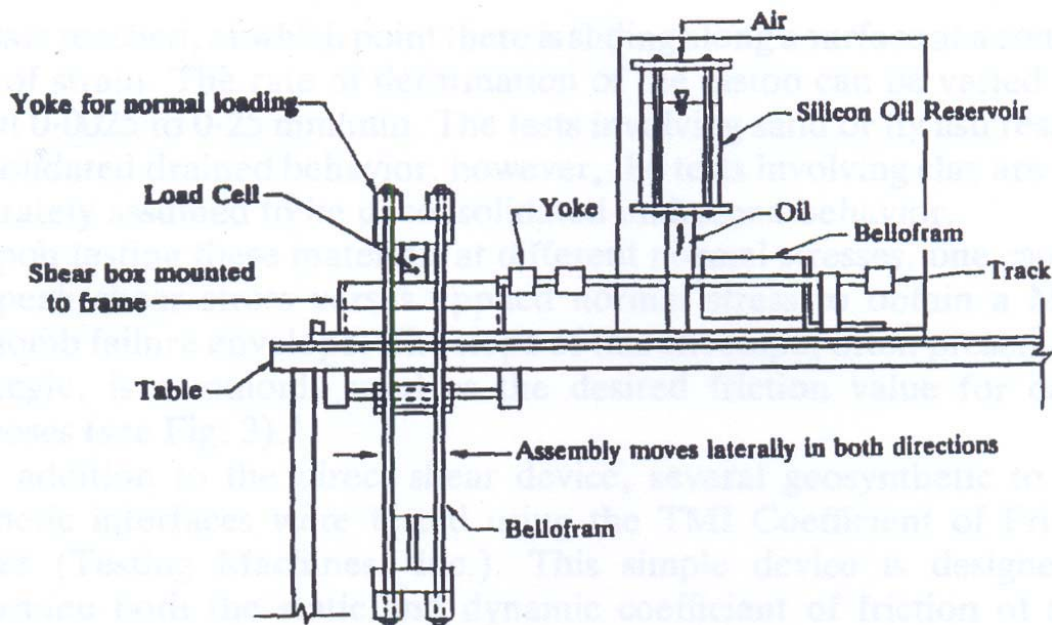


Figura 46 - Equipamento reportado por Koutsourais *et al.* (1991).

Dembicki *et al.* (1990) reportam o equipamento da Faculty of Geotechnics of de Technical University of Gdansk (Polônia). As Figuras 47 e 48 apresentam uma vista geral e alguns detalhes do equipamento. Este equipamento apresenta como particularidade a capacidade de realizar ensaios de cisalhamento direto convencional e arrancamento.

Neste equipamento as caixas de ensaio são retangulares e apresentam dimensões internas de 400mm de comprimento por 250mm de largura, não sendo informada sua profundidade (Figura 48c). A caixa superior é fixada a estrutura, sendo impedido seu deslocamento horizontal, e a inferior móvel, deslizando sobre roldanas com o objetivo de diminuir o atrito.

A força de confinamento é aplicada através de um macaco hidráulico associado a uma tampa rígida. As cargas aplicadas são mensuradas através de uma célula de carga conforme a Figura 48b. Já o sistema de aplicação de força cisalhante consiste de um sistema de engrenagens acoplado a um motor que permite aplicar pequenos deslocamentos.

Não são reportadas as formas de mensuração das grandezas envolvidas durante o ensaio.

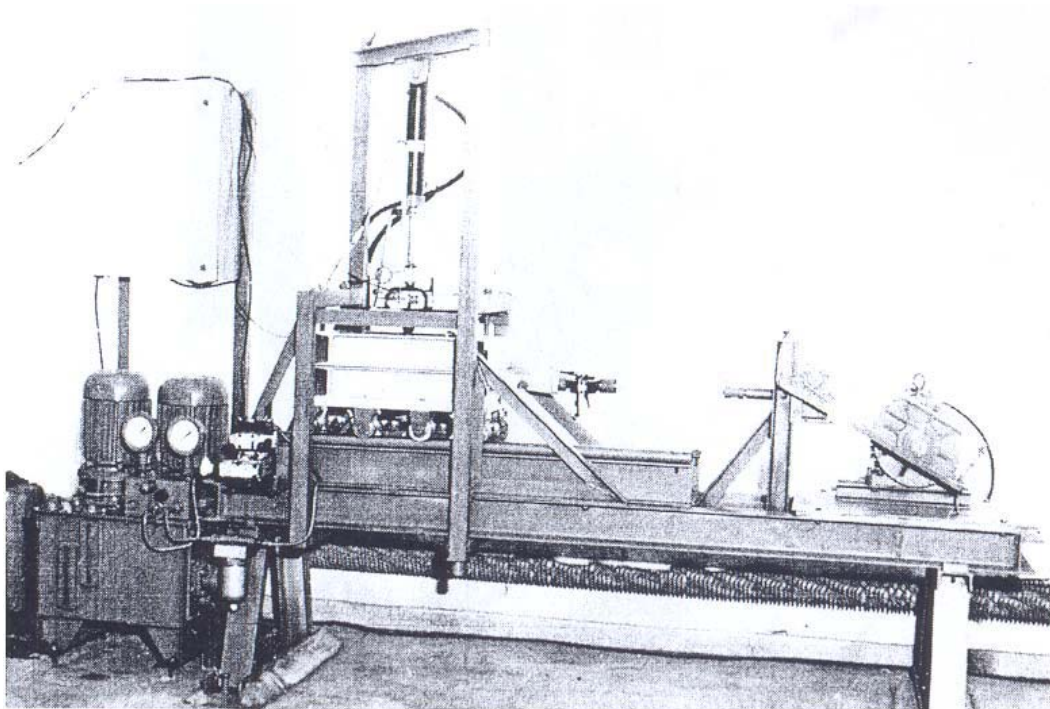


Figura 47 - Equipamento reportado por Dembicki *et al.* (1991) - Vista Lateral.

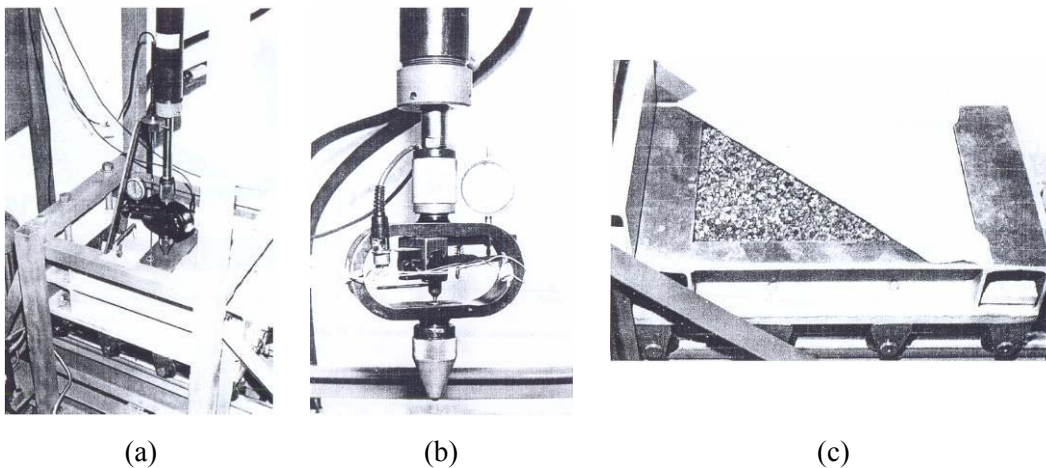


Figura 48 - Equipamento reportado por Dembicki *et al.* (1991). (a) sistema de aplicação de tensão normal; (b) detalhe do sistema de aplicação normal e (c) caixa de ensaio.

O equipamento reportado por Gomes (1993) foi desenvolvido no ITA e é constituído por um conjunto de caixas de ensaio com dimensões internas de 400x250x100mm, montadas em uma estrutura de sustentação e associadas a uma prensa de ensaio convencional (Figura 49).

A caixa superior é selada por uma tampa rígida, dotada de rótula de articulação para a transmissão das cargas verticais. A caixa inferior está apoiada

em um sistema de trilhos e rolamentos com a finalidade de reduzir o atrito com a base. O espaçamento entre as caixas pode ser ajustado.

O sistema de aplicação de força normal é composto por uma viga I de 4 polegadas (10,16cm) com 4m de comprimento, acoplada à estrutura do equipamento. Este sistema de confinamento possui em cada uma de suas extremidades sistemas articulados que atuam como elementos de suporte para conjuntos de pesos, possibilitando aplicações de cargas normais até 30 kN.

O deslocamento relativo entre as caixas é induzido por um eixo conectado à metade inferior e a um anel dinamométrico para a quantificação das cargas aplicadas, que, por sua vez, está conectado ao parafuso de acionamento de uma prensa convencional de cisalhamento direto trabalhando, entretanto, em sentido inverso ao usual. Deslocamentos horizontais e verticais do sistema são obtidos através de extensômetros.



(a) Vista Lateral.

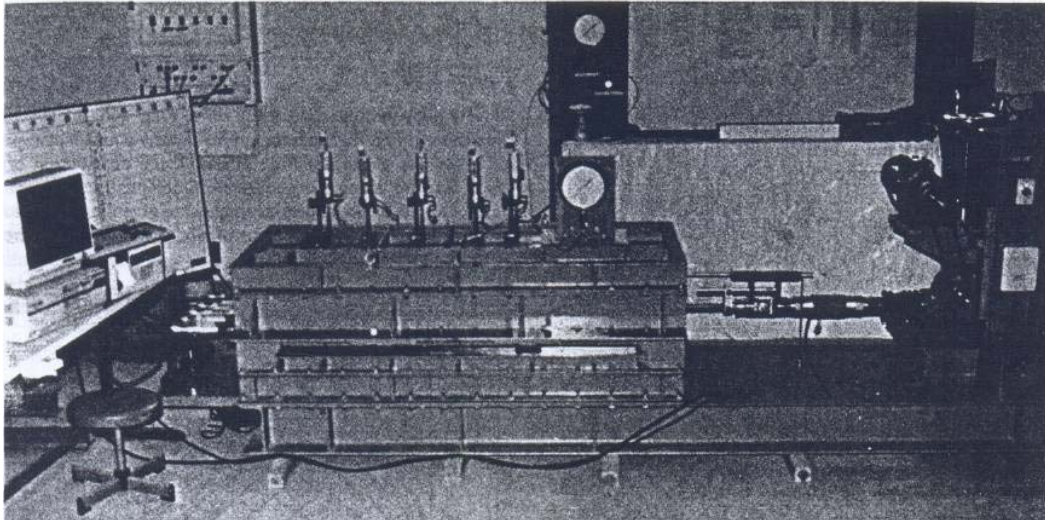


(b) Vista Frontal.

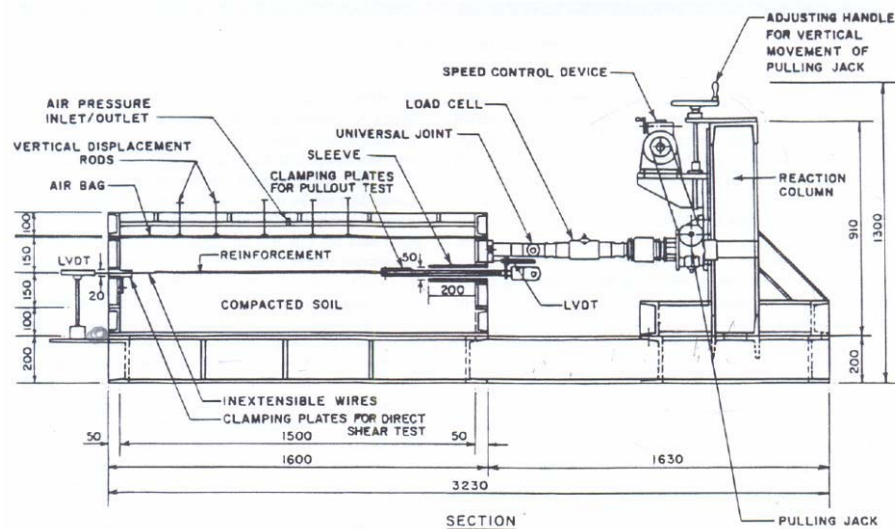
Figura 49 - Equipamento reportado por Gomes (1993).

Alfaro *et al.* (1995) reporta um equipamento capaz de realizar ensaios de arrancamento e cisalhamento direto convencional (Figura 50). No caso do ensaio de cisalhamento direto a área útil de ensaio é de 1,50m de comprimento por 0,60m de largura. A altura total do corpo de prova é de 0,40m. A caixa inferior é fixa e a superior móvel.

O sistema de aplicação de força normal é feito por bolsa de ar e o de força cisalhante por um motor elétrico acoplado a uma caixa de redução. A instrumentação é composta por LVDT's e células de carga conectadas a um sistema de aquisição de dados.



(a)



(b)

Figura 50 - Equipamento reportado por Alfaro *et al.* (1995). (a) Vista lateral e (b) detalhes do equipamento.

O equipamento da Hong Kong University of Science & Technology é reportado por Lee e Manjunath (2000) e apresentado na Figura 51. Ele apresenta caixas de cisalhamento com dimensões internas de 300 x 300mm, superior, e 420

x 300mm, inferior. A caixa inferior pode conter solo ou ser substituída por uma base rígida.

As forças normais e cisalhantes são aplicadas através de um sistema hidráulico. Quatro células de carga mensuram a força normal e duas mensuram a força cisalhante. Os deslocamentos horizontais e verticais são mensurados através de LVDT. Todos os instrumentos estão conectados a um sistema de aquisição de dados acoplado a um microcomputador.

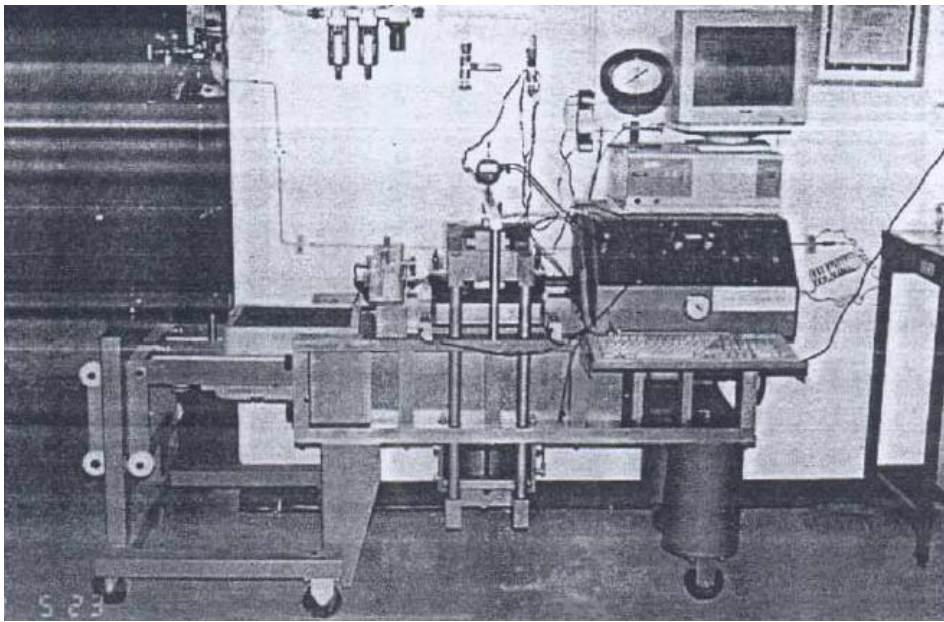


Figura 51 - Equipamento reportado por Lee e Manjunath (2000).

O equipamento reportado por Sieira (2003) pertence ao CEDEX de Madri e é denominado de CIS₁₀₀(Figuras 52 e 53). Este equipamento é capaz de ensaiar corpos de prova cúbicos com cerca de 1m de aresta e executar ensaios de cisalhamento direto, cisalhamento direto com reforço inclinado e arrancamento.

A caixa de cisalhamento é formada por duas metades com seção quadrada com 1m de lado e altura útil de 0,6m. As tensões normais e cisalhantes são aplicadas através de dois macacos hidráulicos servo-controlados associados a células de cargas e transdutores de deslocamento. A capacidade dos macacos é de 1MPa e o curso máximo do macaco de cisalhamento é de 300mm, sendo este, o deslocamento máximo aplicado a caixa inferior.

A aquisição dos dados é feita de forma automática através de um sistema de aquisição de dados.

O procedimento de ensaio é análogo ao do ensaio convencional de pequena escala, onde a caixa superior é mantida imóvel e a caixa inferior se desloca.

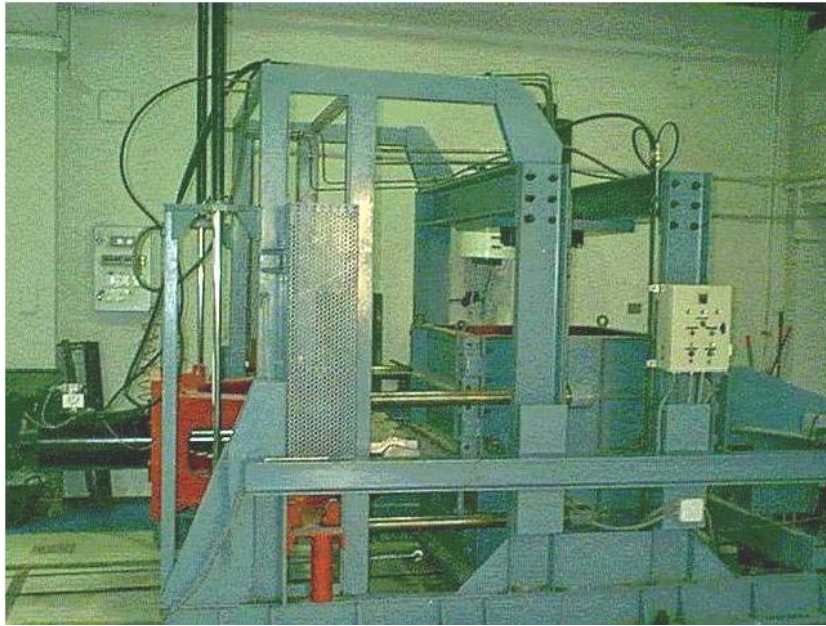
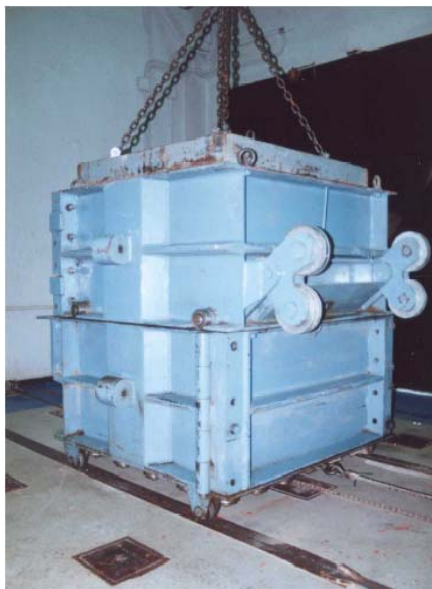


Figura 52 - Equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões - CEDEX-Madri (Sieira, 2003).



(a)



(b)



(c)

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).

Além dos equipamentos anteriormente descritos, Gomes (1993) resumiu diferentes arranjos experimentais e variações de equipamentos de ensaio de cisalhamento direto convencional. As características destes equipamentos são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaio de cisalhamento direto (modificado de Gomes, 1993)

Referência	Caixas de Ensaio						Velocidad e do ensaio (mm/min)	Tensões do ensaio (kPa)	Classificação segundo Ingold (1990)
	Superior			Inferior					
	c	l	h	c	l	h			
Collios (1981)	40	25	10	40	25	10	0,10	25-75	CPF
Ingold (1982)	30	30	nd.	30	30	nd.	1,00	25-200	CPF
Myles (1982)	30	30	12	35	40	nd.	nd.	10-180	CPF
Martin <i>et al.</i> (1984)	10	10	3	nd.	nd.	nd.	0,13	14-100	CF
Saxena <i>et al.</i> (1985)	26	26	19	31	26	8	0,76	69-207	CPF/CBL
Degoutte <i>et al.</i> (1986)	30	30	15	30	30	15	0,20	200-1200	CPF
Miyamori <i>et al.</i> (1986)	32	32	12	48	41	nd.	0,50	50-200	CPF
Williams <i>et al.</i> (1987)	31	31	5	31	31	5	0,30	<100	CPF
Lafleur <i>et al.</i> (1987)	15	15	5	15	15	5	0,02	50-150	CPF
Fourier <i>et al.</i> (1987)	6	6	2	6	6	2	0,01-0,9	50-350	CPF
Chen <i>et al.</i> (1990)	15	15	nd.	19	17	nd.	nd.	25-196	CPF/CBL
Garbulewski (1991)	6/	6/							
	10/	10/	nd.	nd.	nd.	nd.	0,01-1,00	18-80	CF
	12	12							

c = comprimento da caixa (cm), l = largura da caixa (cm) e h = altura da caixa (cm); D = diâmetro (cm); CF = caixa fixa; CPF = caixa parcialmente fixa; CL = caixa livre; CBL = caixa de base larga e CBC = caixa de base central.

Sobre este conjunto de equipamentos, o autor agrupou os seguintes aspectos relevantes:

- (i) dimensões das caixas de cisalhamento: as caixas de ensaio apresentam dimensões que vão desde 6x6cm (ensaio convencional) até cerca de 30x30cm. Em geral ambas as caixas tem dimensões iguais. Em alguns equipamentos a caixa superior é menor que a inferior, permitindo elevadas deformações sem variação da área de cisalhamento;
- (ii) espessura das camadas de solo: verifica-se que a espessura das camadas de solo é variável, tendo sido adotados valores iguais ou não para os solos de cobertura e de suporte;
- (iii) dispositivos de aplicação variados e incluem: mecanismos hidráulicos, pneumáticos, tipo alavanca, etc. A faixa de aplicação de tensão normal varia de 5 a 1200kPa;
- (iv) sistema de ancoragem de geossintético são diversos;
- (v) variação da velocidade de cisalhamento ampla, de 0,01mm/min até 3mm/min.

Observando a lista de equipamentos reportados por Gomes (2003), constata-se que ela é caracterizada por apresentar equipamentos de pequeno porte (área de contato menor que 0,1m²).

Mas independente do porte, pequeno ou grande, os ensaios de cisalhamento direto sempre são compostos por caixas de ensaios, sistema de aplicação de força (normal e cisalhante) e sistema de medição. Porém, são influenciados por uma série de fatores. Estes fatores podem ser de dois tipos: associados ao equipamento e aos materiais de ensaio.

3.3.3.

Fatores de influência dos ensaios de Cisalhamento Direto associados ao equipamento

Influência da Posição Relativa

A influência da posição relativa foi estudada por Ingold (1984), Saez (1997) e Nakamura *et al.* (1999). Ingold (1984) realizou uma série de ensaios de cisalhamento direto utilizando uma areia e três tipos de geossintéticos (geotêxtil não-tecido, geotêxtil tecido agulhado e geogrelha). Nestes ensaios, foram empregadas caixas de cisalhamento com dimensões 300mm x 300mm, com duas condições diferentes de montagem. Na primeira o geossintético se encontrava entre duas camadas de solo (superior e inferior), conforme a Figura 44a. Na segunda, o geossintético ficava posicionado sobre um bloco rígido (Figura 44b). As Figuras 54 e 55 apresentam alguns dos resultados obtidos.

De uma forma geral os ensaios de cisalhamento direto para as interfaces com geotêxtil forneceram resultados parecidos, com uma diferença de apenas 2°. Observa-se, entretanto, que os resultados dos ensaios com geogrelhas são significativamente diferentes. Este mesmo comportamento foi observado por Saez (1997) que executou ensaios de cisalhamento direto com geogrelhas para as duas condições distintas de montagem em equipamentos de 300 x 300mm (Sieira, 2003).

Nakamura *et al.* (1999) também realizaram estudos de posição relativa do geossintético em relação à camada de solo. Para isso utilizaram um equipamento em que a carga vertical é aplicada de baixo para cima na base da caixa inferior, com uma célula de carga acoplada. O deslocamento vertical do corpo de prova foi medido através dos deslocamentos da placa de carregamento (Figura 56). Os autores utilizaram três métodos distintos de colocação do reforço: (a) geogrelha instalada entre as camadas de solo, isto é, na posição do plano potencial de ruptura (Figura 57a), (b) geogrelha colada na placa sobre a camada de solo (Figura 57b) e (c) a geogrelha colada na placa sob a camada de solo (Figura 57c).

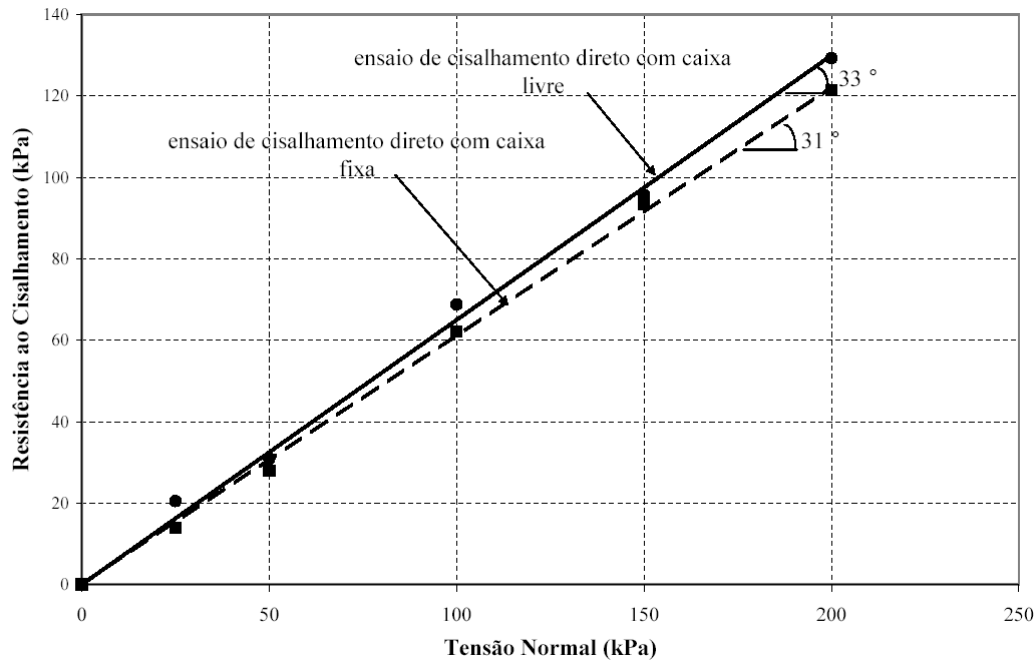


Figura 54 - Efeito da posição relativa nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geotêxtil tecido tricotado, caixa 300mm x 300mm (Adaptado de Ingold, 1984).

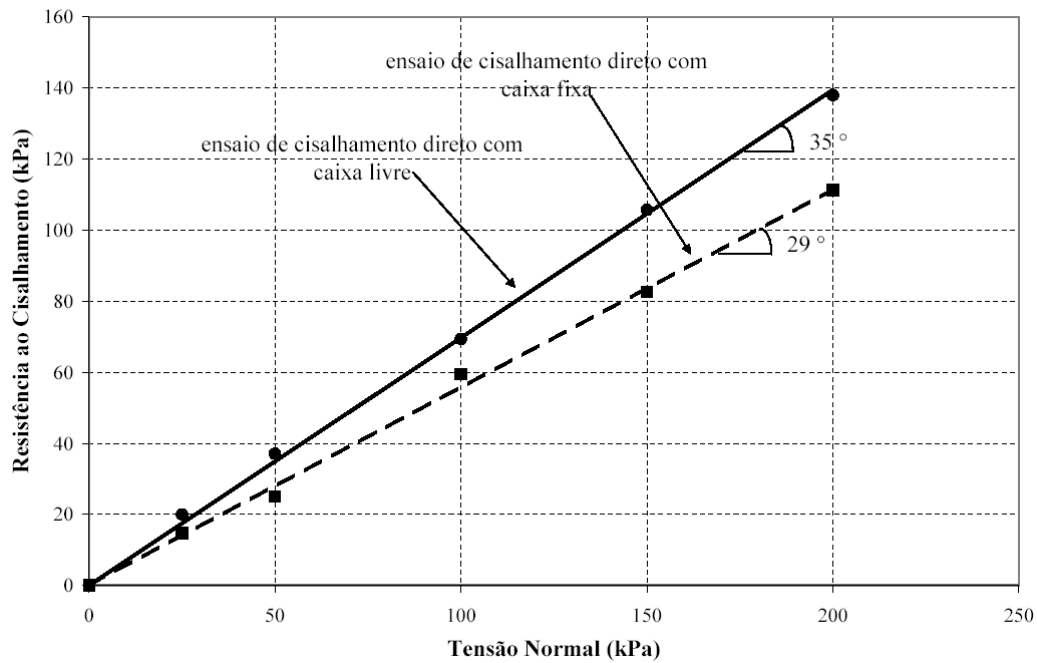


Figura 55 - Efeito da posição relativa nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geogrelha, caixa 300mm x 300mm (Adaptado de Ingold, 1984).

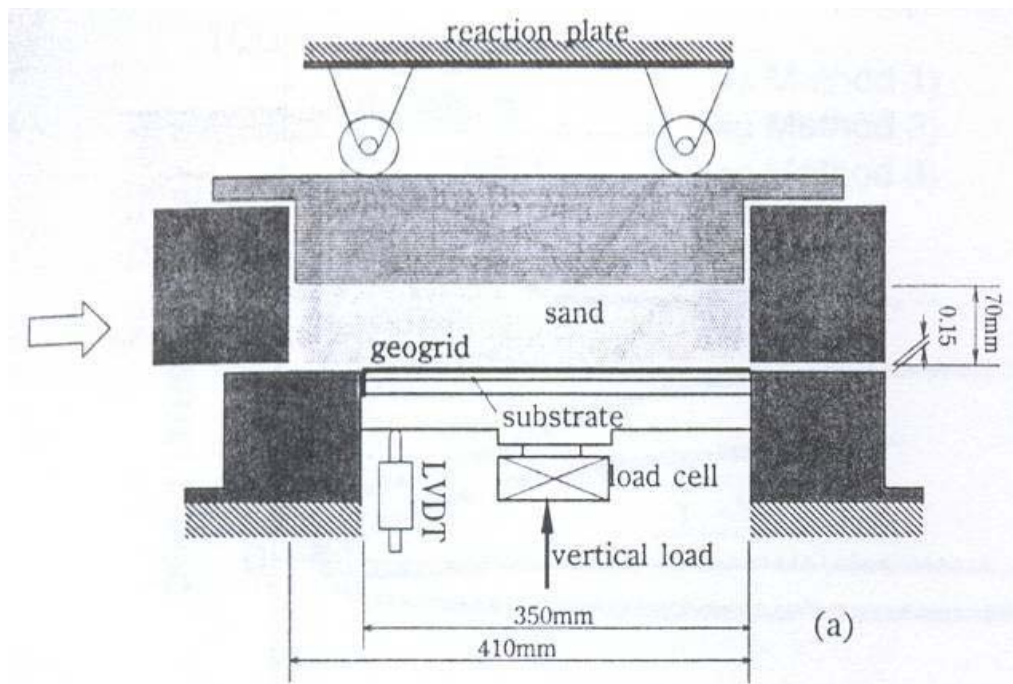
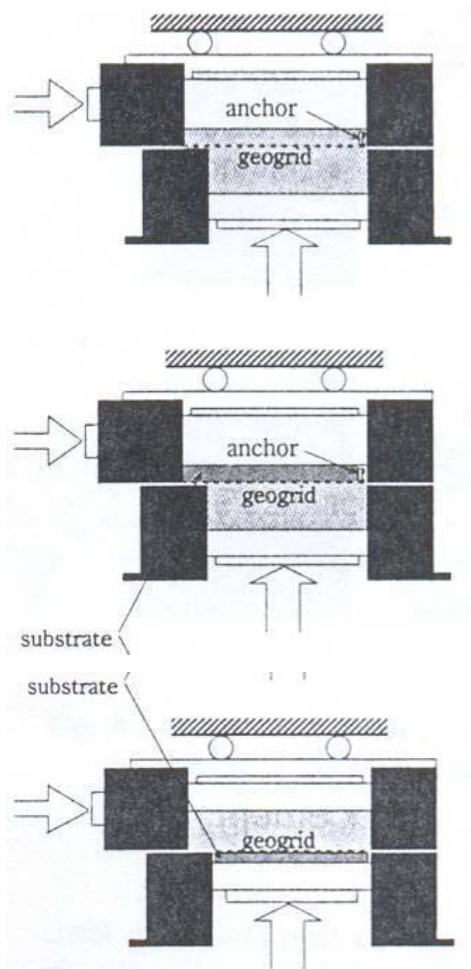


Figura 56 - Equipamento utilizado por Nakamura *et al.* (1999).



(a) Geogrelha entre duas camadas de areia

(b) Geogrelha fixa na caixa superior, com solo na caixa inferior

(c) Geogrelha fixa na caixa inferior, com solo na caixa superior

Figura 57 - Configurações da posição do reforço (Nakamura *et al.* 1999).

De acordo com os resultados da Figura 58, estes autores verificaram que na configuração “a” pode-se formar um plano de cisalhamento de pequena espessura devido à ocorrência de dilatância. Nesta situação, mede-se a resistência entre partículas de solo e não entre o solo e o geossintético.

Quando se utiliza a configuração “b”, à medida que o cisalhamento progride, as aberturas das geogrelhas vão sendo preenchidas com as partículas de solo. Desta forma, as tensões passam a ser totalmente transmitidas às partículas de solo que estão nessas aberturas.

Quando se recorre à configuração “c”, verifica-se a ocorrência de dilatância (aumento de volume) durante o cisalhamento, sendo a tensão de cisalhamento de pico tão elevada como a da própria areia, aproximando-se este valor do residual à medida que o cisalhamento avança.

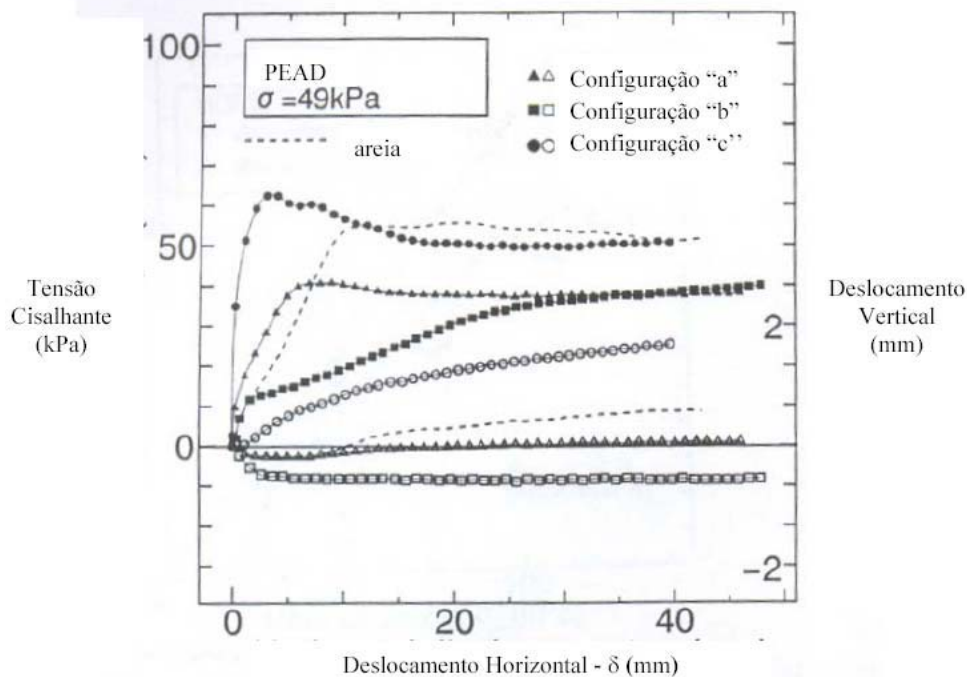


Figura 58 - Relação entre a tensão de cisalhamento e os deslocamentos horizontal e vertical (Nakamura *et al.*, 1999).

Observando os resultados de Nakamura *et al.* (1999), constata-se que eles são muito próximos na condição residual, embora haja algumas diferenças devidas ao mecanismo de mobilização de resistência. O mesmo não ocorre com a condição de pico. Assim, os autores recomendam a utilização do terceiro método

para a definição da resistência da interface solo-geossintético, quando se utiliza ensaios de cisalhamento direto.

As divergências apresentadas por Ingold (1984), Saez (1997) e Nakamura *et al.* (1999) podem estar relacionadas ao tipo de malha da geogrelha. Espera-se que, quanto menor a área da geogrelha disponível para o atrito na interface solo-geogrelha, maior a contribuição do atrito solo-solo. Neste caso, a utilização de um bloco rígido pode subestimar o atrito na interface. No entanto, se a geogrelha apresenta aberturas pequenas e uma área de atrito significativa, a opção de uso do bloco rígido também pode ser adequada.

Influência das Dimensões do Equipamento

Segundo Sieira (2003), as caixas de cisalhamento direto apresentam usualmente seção quadrada, com dimensão das arestas internas variando desde 60mm (equipamentos convencionais) até 1000mm (equipamentos de grande porte). Entretanto, em alguns casos, a caixa inferior é maior do que a superior, permitindo a obtenção de grandes deslocamentos cisalhantes sem variação da área de contato.

A ASTM D-5321 especifica que, para ensaios de cisalhamento direto envolvendo interfaces solo-geossintéticos, as caixas de ensaio devem apresentar dimensões mínimas de 300 x 300mm.

Para geogrelhas, as dimensões da caixa de cisalhamento dependem das dimensões das partículas de solo e da abertura da malha. Em relação às dimensões das partículas do solo, Jewell e Worth (1987) recomendam que a menor dimensão da caixa de ensaio deve ser, no mínimo, 50 vezes maior que o diâmetro médio das partículas de solo (D_{50}) e 12 vezes maior que a maior partícula de solo. Com relação às dimensões da geogrelha, a dimensão mínima da caixa deve ser pelo menos 5 vezes maior do que a abertura máxima da geogrelha ensaiada.

Sieira (2003) reporta estudos referentes à influência das dimensões das caixas de ensaios realizados por Ingold (1984), Palmeira (1987) e Saez (1997). Estes resultados são apresentados nas Figuras 59 a 61.

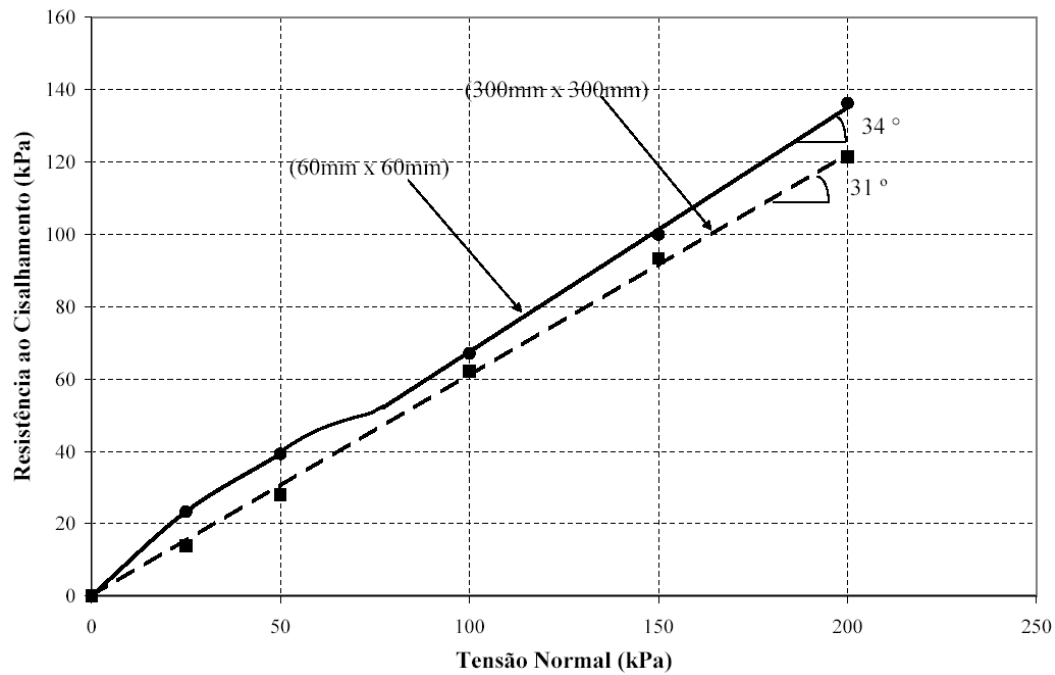


Figura 59 - Efeito da dimensão do equipamento nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geotêxtil tecido tricotado (Adaptado de Ingold, 1984).

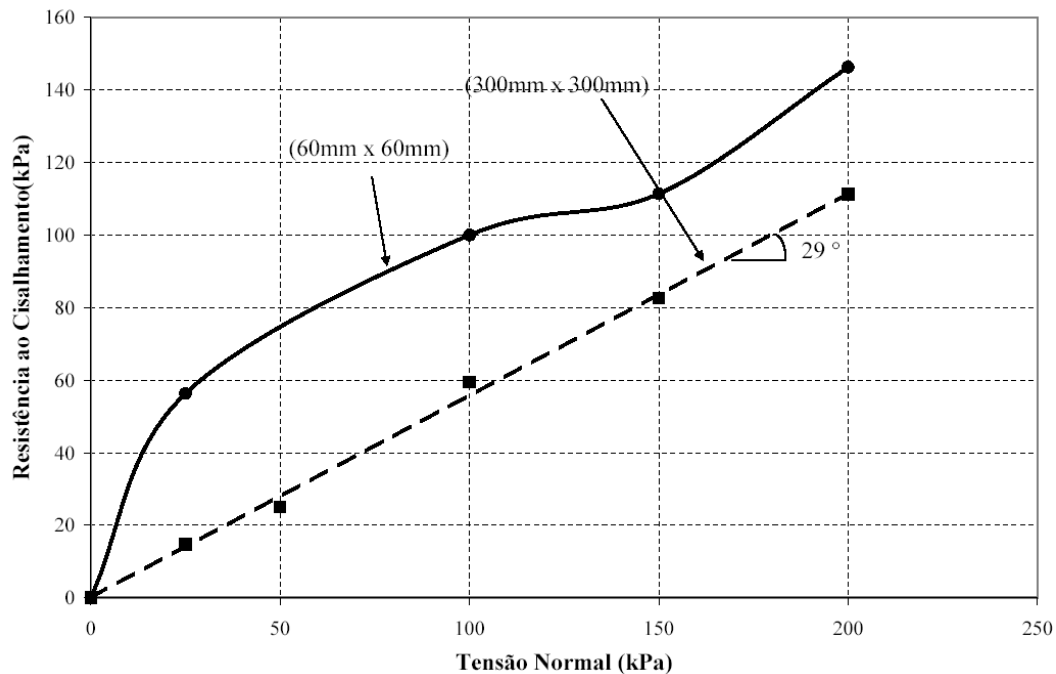


Figura 60 - Efeito da dimensão do equipamento nos resultados de ensaios de cisalhamento direto para interfaces areia - geogrelha (Adaptado de Ingold, 1984).

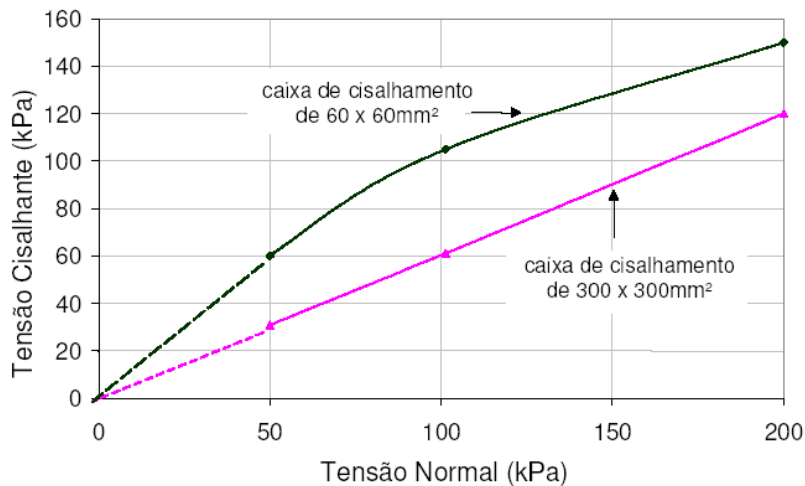


Figura 61 - Efeito das dimensões do equipamento de cisalhamento direto para geogrelha e areia (Adaptado de Saez, 1997).

Da mesma forma que para o estudo de influência de posição relativa, os ensaios de Ingold (1984) para interfaces com geotêxtil apresentam resultados semelhantes quanto ao ângulo obtido. Os ensaios com solo-geotêxtil tecido (caixa de 60 x 60mm) apresenta um comportamento não linear indicando uma dependência entre o ângulo de atrito e a tensão normal aplicada.

Os dois autores executaram ensaios com geogrelhas em areia, com caixas de mesmas dimensões, sendo observado um comportamento semelhante. Para o equipamento de dimensões menores, a envoltória é não linear, implicando em uma dependência entre o ângulo de atrito solo-geogrelha e a tensão normal aplicada. Por outro lado, nos equipamentos de maiores dimensões, a envoltória é linear, fazendo com que o ângulo de atrito independa da tensão normal aplicada. Observa-se também que a envoltória obtida no ensaio com o equipamento de menor dimensão encontra-se acima da envoltória obtida no equipamento de maior dimensão. Desta forma, os autores sugerem a utilização de equipamentos de cisalhamento direto com dimensões iguais ou maiores que 300mm x 300mm, confirmando a recomendação da ASTM D5321.

Hsieh *et al.* (2002) realizaram ensaios com geomembranas de diferentes rugosidades e duas areias. Foram utilizadas caixas de ensaio com dimensões de 100 x 100mm, 200 x 200mm, 300 x 300mm e 400 x 400mm. Os resultados para a interface entre a geomembrana lisa e a areia são apresentados na Tabela 11.

Observa-se que os valores de ângulos de atrito de pico obtidos em ensaios com caixas pequenas são menores do que os obtidos em caixas maiores. Entretanto, os valores residuais são maiores.

Por outro lado, os valores de atrito de pico são maiores e semelhantes a partir das caixas de dimensões 300 x 300mm e 400 x 400mm, pois as maiores dimensões eliminam o efeito de borda.

Tabela 11 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto: interface areia / geomembrana lisa (Hsieh *et al.* 2002)

Tamanho da caixa (mm)	Ângulo de atrito de pico (°)	Ângulo de atrito residual (°)
100 x 100	19,7	17,9
200 x 200	22,4	16,0
300 x 300	24,2	18,9
400 x 400	24,1	19,1

Influência da Espessura das Amostras de Solo

As camadas de solo, tanto de cobertura como de suporte, podem ter espessuras iguais ou diferentes. Gourc *et al.* (1996) estudaram a influência da espessura de solo nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto da interface solo-geossintético (Figura 62).

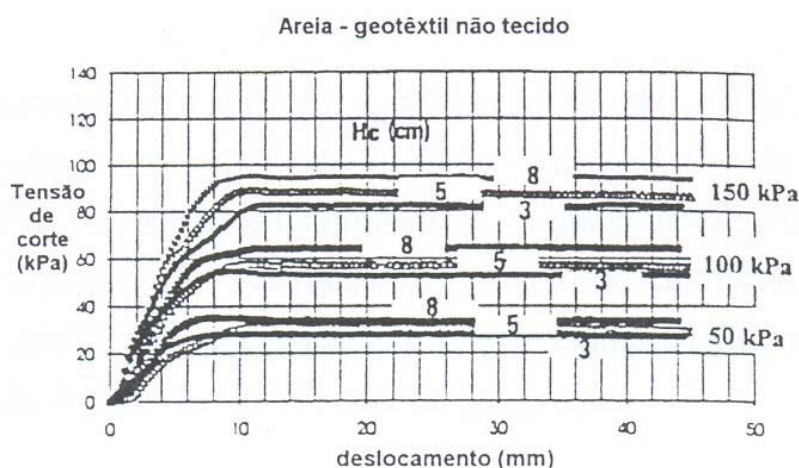


Figura 62 - Influência da espessura de solo da caixa superior na interface areia-geotêxtil em ensaios de cisalhamento direto (Gourc *et al.* 1996).

Os resultados mostraram que a tensão cisalhante aumenta com a espessura de solo para ensaios com geotêxtil não-tecido e areia. A espessura mínima recomendada por Sopena (2002) é da ordem de 5 vezes o diâmetro máximo das partículas de solo (Sieira, 2003).

Influência da Rugosidade do Bloco Rígido

A utilização de blocos lisos ou rugosos para suportar o geossintético é um dos fatores que influenciam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Nestes casos os materiais que mais sofrem influência nos seus resultados são as geogrelhas com malhas de grande abertura. Gourc *et al.* (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto com uma geogrelha com barras espessas, sobre um suporte liso e sobre uma camada de areia como suporte alternativo. Os resultados demonstraram que, no segundo caso, obtém-se uma resistência 20% superior (Figura 63).

Para compensar a limitação referente à rugosidade do bloco, Nakamura *et al.* (1996) sugerem a utilização de uma superfície rugosa que induza uma tensão cisalhante mais elevada devido ao imbricamento entre as partículas de solo e às rugosidades da superfície do bloco nas aberturas da grelha. Uma solução proposta por Gourc *et al.* (1996) seria a colagem de um material rugoso, buscando-se uma rugosidade semelhante à do solo (Sieira, 2003).

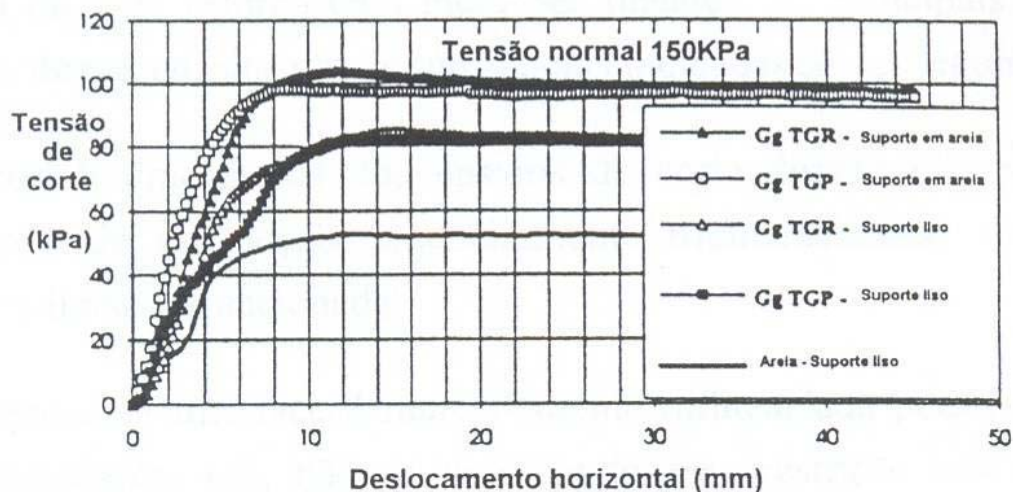


Figura 63 - Influência do suporte no atrito entre a geogrelha e a areia (Gourc *et al.* 1996).

Influência do Sistema de Aplicação de Sobrecarga

Palmeira (1999) apresenta quatro formas diferentes de configuração para aplicação de sobrecargas em ensaios de cisalhamento direto (Figura 64). Segundo ele, na situação mais tradicional, a tensão vertical é aplicada através de uma placa rígida (Figura 65a e b). Outras condições possíveis são à fixação da placa do topo à metade superior da caixa de cisalhamento (Figura 65c) ou a utilização de uma bolsa pressurizada no topo (Figura 65d).

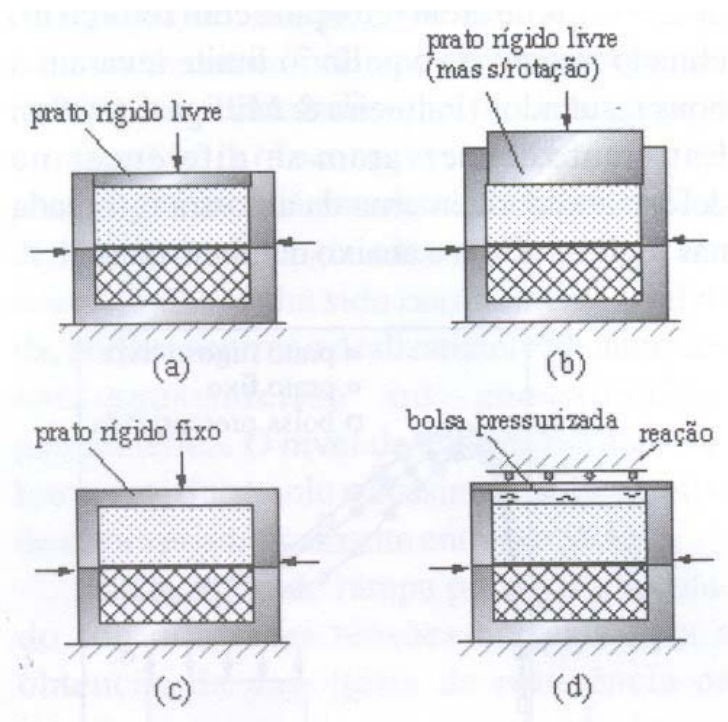


Figura 64 - Condições de fronteiras típicas em ensaios de cisalhamento direto (Palmeira, 1999).

Palmeira (1987) apresenta, também, uma comparação entre os resultados de ensaios com areia densa para diferentes condições de fronteira no topo em termos de tensão cisalhante no plano central (τ) normalizado pela tensão normal (σ) (Figura 65). Ele observa que o deslocamento cisalhante na ruptura e o ângulo de atrito a volume constante foram pouco afetados pelas diferentes condições de fronteira. O ângulo de atrito secante de pico nas condições do ensaio foi cerca de 2° superior para o caso com bolsa flexível no topo.

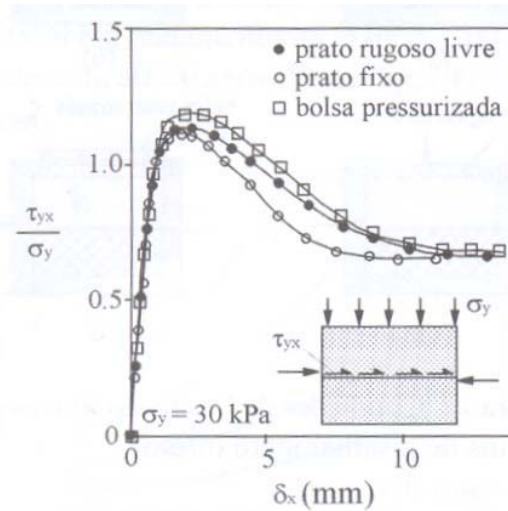


Figura 65 - Ensaio de cisalhamento direto em areia densa com diferentes condições de fronteira (Palmeira, 1987).

Nakamura *et al.* (1999) utilizaram para avaliar esta condição de contorno o equipamento apresentado na Figura 56 e outro equipamento (Figura 66), onde a carga vertical é aplicada de cima para baixo no topo da caixa superior através de uma membrana de borracha pressurizada. Neste equipamento a medição da tensão normal era feita por uma célula de carga instalada na base da caixa inferior.

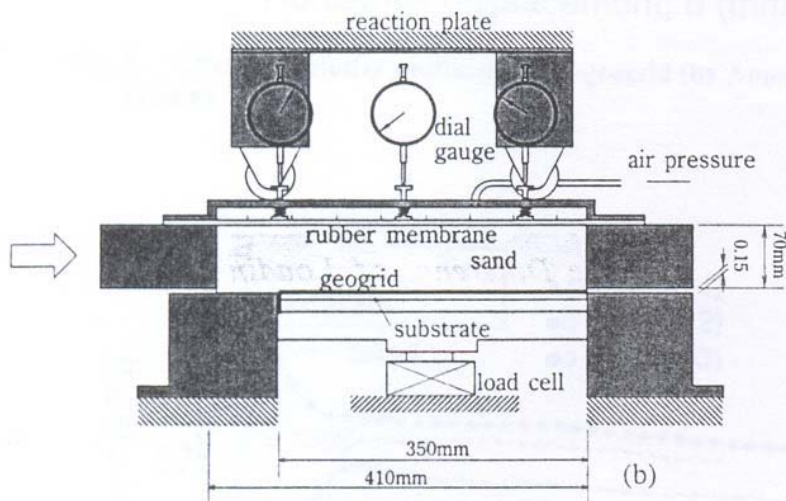


Figura 66 - Representação esquemática do aparelho de cisalhamento direto em que a carga é aplicada de cima para baixo no topo da caixa superior (Nakamura *et al.*, 1999) - Configuração B.

Na Figura 67 são apresentadas as relações tensão cisalhante/tensão normal obtidas em ensaios de cisalhamento utilizando estas duas metodologias. No caso do equipamento da Figura 56, a força normal é aplicada e medida na mesma face,

pelo que a tensão normal medida tem sempre o mesmo valor constante. Por outro lado, a célula de carga que mede a tensão normal no aparelho da Figura 65 está do lado oposto ao sistema de aplicação da tensão normal. Esta tensão varia, durante o cisalhamento, devido à dilatação das partículas de solo na vizinhança do plano de cisalhamento, apesar da pressão normal aplicada ser mantida constante.

Sendo assim, é necessário medir a tensão normal instalada no plano de cisalhamento com o geossintético, dado que esta tensão normal pode variar durante o cisalhamento.

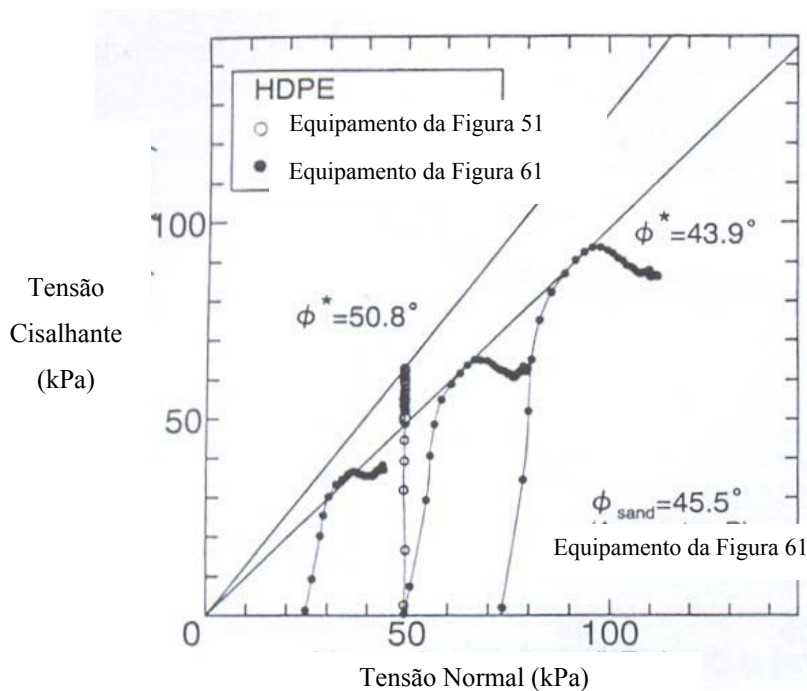


Figura 67 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto obtidos com o equipamento da Figura 56 e o equipamento da Figura 66 (Nakamura *et al.*, 1999).

3.3.4.

Fatores que influenciam os ensaios de Cisalhamento Direto associados aos materiais

Os resultados também são influenciados por uma série de fatores associados aos materiais ensaios e dentre eles podemos destacar.

Densidade Relativa

Gomes (1993) estudou a influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético. O autor concluiu que o ângulo de atrito de interface é

proporcional a densidade relativa do solo. Quanto maior for a densidade relativa maior será o ângulo de atrito do solo (Tabela 12). Porém, em termos de resistência residual, as interfaces com solos fofos ou densos tendem a resultados similares.

Tabela 12 - Influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Areia		Geotêtil OP20 (*)		Geotêtil OP30 (*)		Geotêtil OP60 (*)		Geotêtil PR-2004 (**)	
	c	ϕ	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}
	Areia fofa	0	38,0	0	38,0	1	37,0	0	36,5	1
Areia densa	3	41,0	4	40,5	4	40,0	4	40,0	5	36,0

(*) geotêxteis não tecidos e (**) geotêtil tecido.

Lee e Manjunath (2000) apresentaram alguns resultados sobre a influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Tabela 13). Porém não comentaram os resultados obtidos.

Tabela 13 - Influência da densidade relativa em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Lee e Manjunath, 2000)

Interface	Areia		Amoco 2000 (**)		Reemay 3401 (*)		Televev 70/70 (**)	
	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}
Dr 50%	0	33,5	0	32,5	0	33,2	0	31,1
Dr 80%	0	34,8	0	33,0	0	33,2	0	31,2

(*) geotêxteis não tecidos e (**) geotêtil tecido.

Entretanto, diferentemente de Gomes (1993), observa-se que o aumento da densidade relativa não acarretou em um aumento significativo do ângulo de atrito de interface. A explicação para este comportamento está nas características dos materiais utilizados nos ensaios, a areia “UST sand” (Figura 68a) e os geotêxteis Amoco 2000 (Figura 68b), Reemay 3401 (Figura 68c) e Televev 70/70 (Figura 68d).

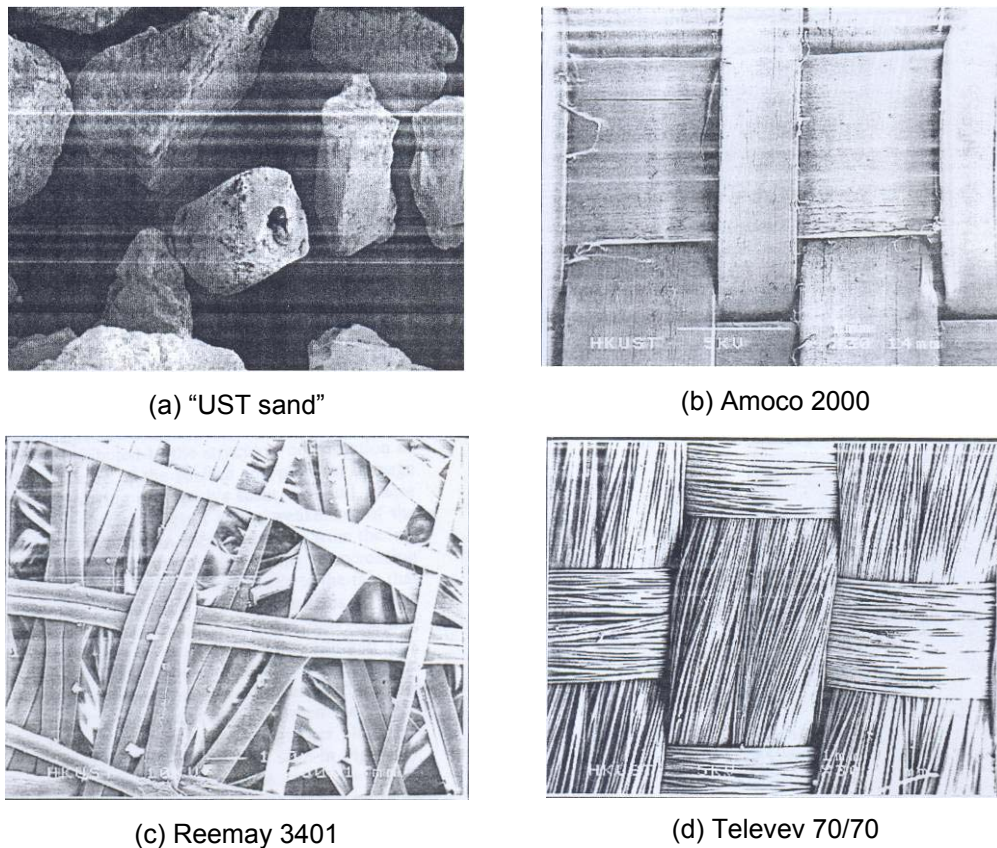


Figura 68 - Materiais utilizados por Lee e Manjunath (2000).

Os grãos areia "SUT sand" foram caracterizados como subangulares com bordas arredondadas. Esta característica diminui o imbricamento dos grãos, facilitando o rolamento dos mesmos sobre a superfície da manta. Os geossintéticos no caso do geotêxteis tecidos, apresentam uma superfície menos rugosa quando comparado com o geotêxteis não-tecidos, justificando a pouca variação no valor do ângulo de atrito de interface.

Umidade do Solo

Gomes (2003), também estudou a influência da umidade nos resultados de interfaces solos não-coesivos e solos coesivos com geotêxteis. No caso de solos não-coesivos se observou que o ângulo de atrito de interface é pouco afetado pelo teor de umidade do solo, tanto no caso de geotêxteis não-tecidos como no caso de geotêxteis tecidos. No caso de solos coesivos o ângulo de atrito de interface decresce com o aumento da umidade do solo. Observou-se, para geotêxteis não-tecidos, que o ângulo de atrito de interface pode variar sensivelmente para estes

materiais devido a suas propriedades drenantes. A Tabela 14 apresenta alguns dos resultados obtidos pelo autor.

Tabela 14 - Influência do teor de umidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Solo-solo		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	ϕ	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}
Areia densa seca	3	41,0	4	40,0	5	36,0
Areia densa úmida	6	40,5	5	40,5	6	35,0
Caulinita (***)	22	32,0	18	34,0	18	29,5
Caulinita (****)	20	24,0	12	29,0	13	21,5

(*) geotêxteis não tecidos, (**) geotêxtil tecido, (***) 28% de umidade, (****) 34% de umidade

Rigidez

A rigidez à tração do reforço é definida como sendo a relação entre força e deformação. Jewell e Wroth (1987) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto mostrando que quanto maior a rigidez à tração (reforço inextensível) mais frágil é o maciço reforçado. Entretanto, se a rigidez for menor (reforço extensível), maior será a ductilidade do maciço reforçado (Figura 69).

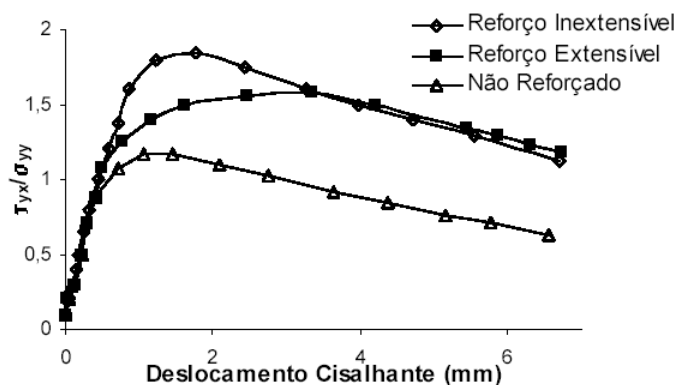


Figura 69 - Efeito da rigidez do geossintético (Jewell e Wroth, 1987).

Gomes (1993), estudando o comportamento da interface areia-geotêxtil não-tecido em ensaios de tração confinada, verificou que um aumento do confinamento resulta num aumento da rigidez a tração. O autor verificou,

também, que o efeito do confinamento é mais evidente no comportamento dos geotêxteis não-tecidos, pois estes materiais possuem suas fibras dispostas aleatoriamente e o confinamento do solo impede a reorientação das fibras na direção do carregamento, o que não acontece para a situação sem confinamento (Figura 70).

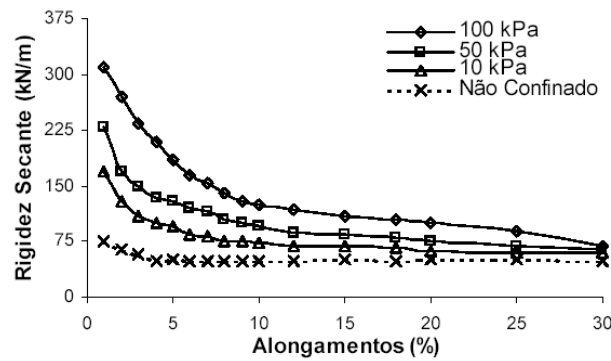


Figura 70 - Efeito do confinamento na rigidez de geossintéticos (Gomes, 1993).

Rugosidade da Superfície do Geossintético

O estudo da influência da rugosidade do geossintético, geralmente geomembranas, na resistência ao cisalhamento da interface, seja ela com solo ou com outro geossintético, tem sido objeto de diversos autores (Giroud *et al.*, 1990; 1998; Izgin e Wasti, 1998; Wasti e Özdüzgün, 2001). Em todos os trabalhos se observa que a rugosidade induz um acréscimo de resistência da interface como mostra a Figura 71. Este comportamento é função da forma mobilização da resistência da interface, mecanismo de atrito, que é função da rugosidade da superfície do geossintético.

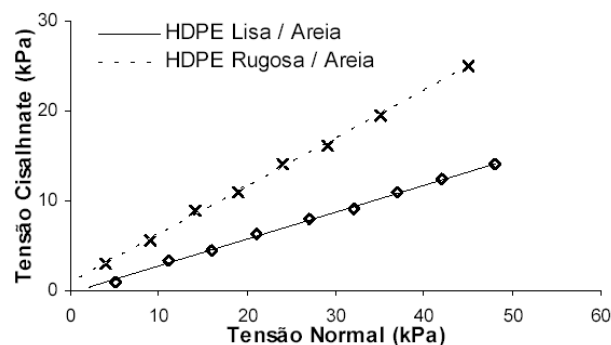


Figura 71 - Efeito da rugosidade na resistência da interface (Izgin e Wastin, 1998).

Granulometria e Angularidade das Partículas

A influência da granulometria e angularidade das partículas do solo foi investigada por Gomes (1993) mediante a análise de interfaces solo-geotêxteis com solos de diferentes faixas granulométricas (brita, seixo, pedrisco e areia) e diferentes angularidades dos grãos (brita com grãos angulares e seixo com grãos arredondados). A Tabela 15 apresenta os resultados.

Tabela 15 - Influência da granulometria e angularidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Solo		Geotêxtil OP20 (*)		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil OP60 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	ϕ	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}
	Areia	0	38,0	0	38,0	1	37,0	0	36,5	1
Pedrisco	0	37,0	1	37,0	1	37,0	0	37,0	1	35,0
Seixo	0	41,0	2	41,0	1	41,0	0	40,5	0	38,5
Brita	0	45,0	8	42,0	10	44,5	10	43,0	1	42,0

(*) geotêxteis não tecidos e (**) geotêxtil tecido.

Em geral, o aumento da granulometria do solo acarreta num aumento dos parâmetros de interface. Este aumento pode ser justificado por mecanismos como travamento, bloqueio e imbricamento dos grãos do solo na superfície do geotêxtil.

Entretanto, são observados maiores valores de ângulo de atrito de interface e de adesão para os geotêxteis não-tecidos. Esta diferença pode ser explicada pelas características da superfície da manta têxtil tecida. A natureza essencialmente lisa da superfície do geotêxtil tecido é um fator condicionante para que o mecanismo básico de ruptura ao longo da interface ocorra por deslizamento e rolamento das partículas resultando em parâmetros de interfaces mais baixos quando comparados com os geotêxteis não-tecidos.

A influência da angularidade dos solos foi investigada a partir da comparação dos resultados obtidos para interfaces com brita e seixo rolado. Estes materiais estão enquadrados dentro de uma mesma faixa granulométrica (4,8 - 9,5mm). Gomes (1993) afirma que a angularidade dos grãos tende a intensificar

os efeitos de travamento e bloqueio do solo ao longo da manta têxtil, proporcionando a mobilização de maiores tensões cisalhantes.

3.4. Considerações Finais

O ensaio de rampa é simples de executar. Seu procedimento de preparação, execução e análise são parecidos com os do cisalhamento direto. Porém, uma atenção especial deve ser dada à variação de tensão normal, uma vez que esta pode interferir nos resultados.

Na revisão são apresentados a referência normativa do ensaio e alguns equipamentos reportados na bibliografia. A norma especifica o tamanho mínimo das caixas de ensaio, a razão mínima entre a altura caixa e o tamanho da maior partícula, as possíveis configurações de ensaio (ausência ou não da caixa inferior), a velocidade indicada para o ensaio e os dispositivos de medição de deslocamento, ângulo e aplicação de sobrecargas.

O porte dos equipamentos reportados na bibliografia varia consideravelmente. A Tabela 16 apresenta o resumo das principais características.

Tabela 16 - Ensaio de Rampa - resumo das características

Autor	Caixas de Ensaio						VI (cm/min)	Medições	STN
	Inferior			Superior					
	c	l	h	c	l	h			
Girard <i>et al.</i> (1990)	100	100	5	100	100	20	5	AI	peso do solo
Gourc <i>et al.</i> (1996)	150	150	?	100 ou 50	100 ou 50	?	?	AI, DH	solo e placas de aço
Izgin (1997)	não tem caixa inferior			60 200 300	60 200 300	?	1 a 6,5 (°/min)	?	solo e placas de aço
Lalarakotoson <i>et al.</i> (1999)	não tem caixa inferior			100	70	30	?	AI, DH	peso do solo

c = comprimento da caixa (cm), l = largura da caixa (cm) e h = altura da caixa (cm);

VI = velocidade de inclinação da caixa;

STN = sistema de aplicação de tensão normal;

AI = ângulo de inclinação da rampa, DH = deslocamento horizontal da caixa superior, CG = carga no geossintético e CV = carga vertical aplicada na amostra;

Tabela 16 (cont.)- Ensaio de Rampa - resumo das características

Autor	Caixas de Ensaio						VI (cm/min)	Medições	STN
	Inferior			Superior					
	c	l	h	c	l	h			
Lima Jr. (2000)	200	50	var.	192	47	25	?	AI, DH, CG, CV	solo e placas de concreto
Lopes (2001)	51	35	8	30	30	8	0,5	AI, DH, CV	solo e placas de aço
Briançon et al (2002)	200	120	30	100	100	50	0,5 a 3,5 (°/min)	AI, DH, CG	peso do solo
Najero (2003)	não tem caixa inferior			não tem caixa superior			5 (°/min)	AI	placas de concreto
Aguiar (2003)	120	100	5	100	100	5	~1 (°/min)	AI, DH	solo e placas de aço

c = comprimento da caixa (cm), l = largura da caixa (cm) e h = altura da caixa (cm);

VI = velocidade de inclinação da caixa;

STN = sistema de aplicação de tensão normal;

AI = ângulo de inclinação da rampa, DH = deslocamento horizontal da caixa superior, CG = carga no geossintético e CV = carga vertical aplicada na amostra;

A maioria dos equipamentos reportados pode ser considerada de grande porte (áreas de contato superiores a 1,0 x 1,0m²). A presença ou não da caixa inferior vai depender do tipo de geossintético a ser ensaiado. Em relação à velocidade de ensaio, pode-se afirmar que não existe uma padronização entre os diferentes autores. Porém a norma ISO 12957-2 sugere uma velocidade angular de 5% do comprimento por minuto. Quanto à instrumentação, a maioria dos autores mede ângulos e deslocamentos horizontais (previstos na norma). O sistema de aplicação de sobrecargas (tensão confinante) é sempre por peso, variando-se o material empregado (aço ou concreto).

O ensaio de rampa tem restrições de funcionamento que podem influenciar os resultados. Estas restrições estão ligadas à distribuição da tensão normal, ao tamanho da caixa de ensaio e à rugosidade do plano rígido.

Sobre cada uma delas pode-se destacar:

(i) Influência da Razão Comprimento *vs* Altura: Conforme os estudos numéricos e analíticos feitos por Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002), a distribuição da tensão normal varia durante o ensaio, sendo função da razão entre o comprimento e a altura da caixa de ensaio. Segundo os autores, as dimensões da amostra contribuem significativamente nesta distribuição, sendo o seu efeito mais evidente em equipamentos de pequenas dimensões.

Para uniformizar as tensões, Gourc *et al.* (1996) sugerem o uso de caixas com faces inclinadas e Melo *et al.* (2003) sugerem caixas com razões comprimento-altura elevadas.

(ii) Influência das dimensões do equipamento: Izgin e Wasti (1998) realizaram estudos sobre a influência do tamanho da caixa de ensaio nos resultados do ensaio de rampa. Para isso utilizaram dois solos granulares, quatro geomembranas e três configurações de ensaio. Como resultado destes estudos, os autores concluíram que o aumento do tamanho da caixa de ensaio provocou um aumento do ângulo de atrito de interface.

(iii) Presença do plano rígido: a ausência da camada de solo contida por um caixa inferior pode influenciar os resultados de ensaios com geogrelha. Assim, não é recomendada a utilização de bases rígidas nos ensaios com este tipo de geossintético.

Os ensaios de cisalhamento direto para o estudo de interfaces solo-geossintético seguem os mesmos procedimentos de preparação, ensaio e análise do ensaio de cisalhamento direto convencional em solos.

Nesta revisão são apresentados alguns métodos de ensaio que permitem diversas formas de configuração e fixação de geossintéticos com o intuito de facilitar a medição de força e deslocamento. A escolha de uma ou outra configuração vai ser função do tipo de geossintético a ser ensaiado.

Porém, como todo o ensaio de laboratório, o ensaio de cisalhamento direto tem restrições de funcionamento que podem influenciar os resultados. Estas restrições estão ligadas à posição relativa do geossintético, dimensões do

equipamento, espessura da amostra, rugosidade do bloco onde se assenta o geossintético e sistema de aplicação de tensão normal.

Sobre cada um destas restrições podemos destacar:

(i) Posição relativa do geossintético: a presença ou não de um bloco rígido não interfere significativamente nos resultados de interfaces solo-geotêxtil e solo-geomembrana. Porém o uso do bloco rígido interfere nos resultados de interfaces solo-geogrelha por desprezar a parcela de atrito solo-solo. Sendo assim não se recomenda a utilização de uma base rígida no caso de geogrelhas.

(ii) Influência das dimensões do equipamento: Existe uma recomendação da ASTM que especifica o tamanho mínimo das caixas de ensaio (300mm x 300mm). A influência desta restrição foi estudada por alguns pesquisadores que constataram que, a partir das dimensões 300mm x 300mm, os valores de adesão e ângulo de atrito de interface não sofrem alterações significativas. Porém, deve ser dada atenção à razão dimensão da caixa de ensaio / tamanho da partícula de solo.

(iii) Influência da espessura da amostra de solo: o aumento da espessura da camada de solo acarreta num aumento de tensão cisalhante. Neste caso, tem que ser dada atenção ao fato que existe uma recomendação de altura mínima de caixa de ensaio em função do diâmetro da partícula do solo ensaiado.

(iv) Influência da rugosidade do bloco rígido: no caso de se utilizar o bloco rígido em ensaios de interface-solo geogrelha, deve-se garantir que o bloco tenha uma rugosidade semelhante à do solo.

(v) Influência do sistema de aplicação de sobrecarga. Ficou demonstrado que cada um dos sistemas de confinamentos induz uma diferente tensão normal no plano de cisalhamento. Sendo assim é necessário medir a tensão normal no plano de cisalhamento, dado que o seu valor, nesse plano, pode variar durante o cisalhamento.

4. Desenvolvimento do Equipamento

4.1. Considerações Iniciais

Os ensaios normalmente utilizados no estudo da interação solo-geossintético são os ensaios de cisalhamento direto (e seus derivados) e de arrancamento. A escolha do ensaio mais adequado vai depender do tipo de geossintético ensaiado e do movimento relativo entre ele e a massa de solo, sendo este responsável pela mobilização da resistência de interface.

Nos Capítulos 2 e 3 foram feitas revisões sobre os ensaios de laboratório normalmente utilizados para a avaliação da resistência de interface solo-geossintético. O objetivo desta revisão foi agrupar as informações necessárias para o dimensionamento do equipamento a ser desenvolvido nesta tese. Ela inclui, além dos ensaios propriamente ditos, as referências normativas, equipamentos reportados na bibliografia e fatores que podem influenciar nos resultados, tanto os associados aos equipamentos quanto aos materiais de ensaio.

Foi dada ênfase às diversas configurações de ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado e de rampa. Estas informações subsidiaram o desenvolvimento do equipamento de ensaio de cisalhamento direto, cisalhamento direto com reforço inclinado, rampa e arrancamento.

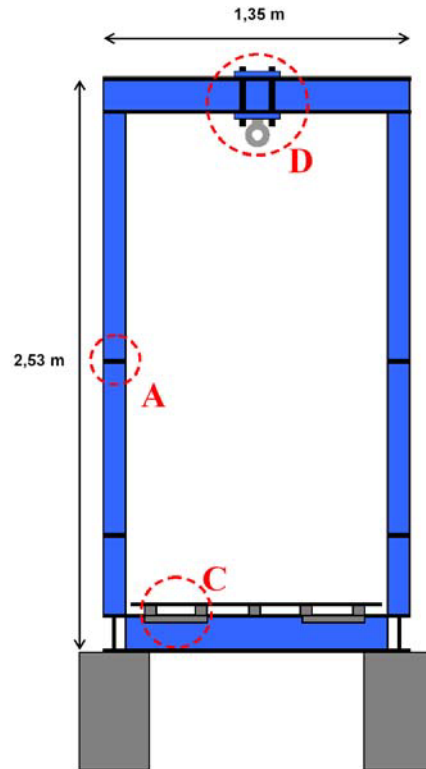
Desta forma este Capítulo apresenta o equipamento desenvolvido, os testes preliminares e as limitações de uso.

4.2. Estrutura Principal

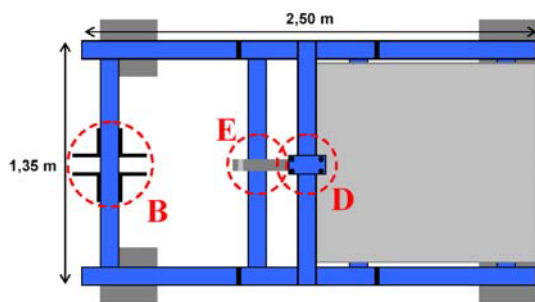
A estrutura é composta por uma série de perfis de aço soldados, formando um sistema único, dimensionado de forma a resistir aos esforços solicitantes dos ensaios propostos. A base é constituída por perfis I de 6" (15,24 cm), com dimensões iguais a 2,50m de comprimento e 1,35m de largura (Figura 72).



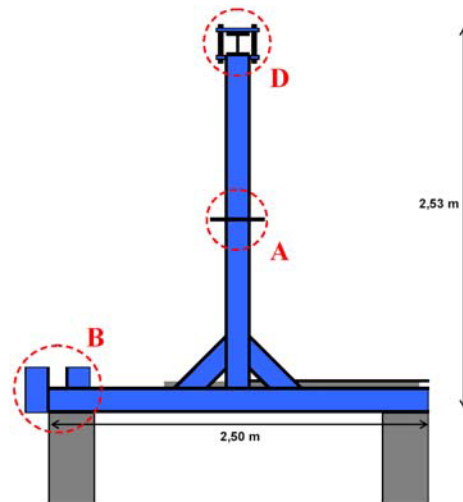
(a) vista geral



(b) vista frontal



(c) vista superior



(d) vista lateral

Figura 72 - Estrutura principal do equipamento desenvolvido.

O pórtico também foi construído com perfis de 6" e tem altura de 2,53m e a mesma largura da base. Ele é dividido em duas partes, detalhe A da Figura 72, para facilitar a movimentação da estrutura (Figura 73). Na extremidade oposta à plataforma de ensaios existe uma estrutura para a ancoragem do sistema de aplicação de força cisalhante (Figura 74) destinadas aos ensaios de cisalhamento, arrancamento e fluência confinada (detalhe B da Figura 72). São quatro cantoneira

com 25cm de comprimento, espessura de 1,27cm e abas de 10cm soldadas a estrutura da base.



Figura 73 - Ligação do pórtico.



Figura 74 - Vista geral do ponto de apoio do sistema de aplicação de força cisalhante dos ensaios de cisalhamento, arrancamento e fluência.

A plataforma de ensaio (Figura 75) é uma placa de aço de 0,64cm de espessura com dimensões de 1,1m de largura por 1,3m de comprimento. Ela foi enrijecida com perfis U de 2' (5,08cm x 2,54cm x 0,64cm) e barras chatas de 2' (5,08cm x 0,32 cm) soldados em sua face inferior. Sua área útil é de 1,0m largura

x 1,2m comprimento, sendo as extremidades destinadas à fixação das caixas de ensaio.



Figura 75 - Plataforma de ensaios.

Ela é ligada à estrutura por meio de duas dobradiças compostas de três tubos de 1,5' (3,81cm) de diâmetro externo, através dos quais se passa um pino de 1' (2,54cm) de diâmetro. Sua porção central é fixada na estrutura e as duas partes menores são fixadas nos perfis U que enrijecem a rampa (Figura 76).



Figura 76 - Dobradiça.

Além disso, a longarina central da plataforma de ensaio prolonga-se por 70cm (Figura 77). A função deste prolongamento é servir de ponto de ancoragem para a corrente do sistema de içamento do ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado.



Figura 77 - Local de fixação do sistema de basculamento.

Esta estrutura foi construída previamente por Aguiar (2003) e corresponde a base para o novo equipamento.

4.3. Componentes do Equipamento

De uma forma geral, cada uma das configurações do equipamento, é composta pelas seguintes partes, ou acessórios:

- (i) caixas de ensaio e garras;
- (ii) sistema de basculamento;
- (iii) sistema de aplicação de cargas (normais e cisalhantes);
- (iv) instrumentação.

4.3.1. Caixas de Ensaio e Garras

As caixas de ensaio e garras foram dimensionadas com base nas recomendações de outros autores e normas disponíveis, seguindo métodos correntes de dimensionamento estrutural.

O primeiro conjunto de caixas de ensaio foi projetado por Aguiar (2003), que seguiu as recomendações de Melo *et al.* (2003) e da norma europeia ISO 12957-2. Esta faculta o uso de uma ou duas caixas de ensaio. Optou-se por utilizar duas caixas de ensaio, por tornar o equipamento mais versátil. Elas apresentam dimensões internas de 1,0m de largura por 1,0m de comprimento (superior) e 1,0m de largura por 1,2m de comprimento (inferior). O uso de uma caixa inferior maior se justifica pelo fato de se manter sempre uma área de contato de 1m² em qualquer momento do ensaio. Além disto, evitam-se perdas de materiais, principalmente solos arenosos, com o movimento da caixa. A diferença de 20cm entre os comprimentos das caixas corresponde ao deslocamento cisalhante máximo permitido pelo sistema. Ambas as caixas têm altura de 5cm. A Figura 78 apresenta o conjunto 1.



Figura 78 - Conjunto de caixas de ensaio 1 - Versão original.

A caixa superior movimentada-se sobre roldanas que correm sobre cantoneiras com aba de 2cm que funcionam como trilhos (Figura 79). Esta solução oferece

algumas vantagens. A primeira é a garantia de que a caixa superior não sofre nenhum tipo de deslocamento lateral que possa comprometer o resultado do ensaio. A segunda é a redução do atrito entre as caixas superior e inferior. Ensaios de calibração mostraram que a caixa superior entra em movimento para inclinações inferiores a $0,5^\circ$. O espaçamento entre as caixas é constante e igual a 3mm.



Figura 79 - Detalhe da roldana da caixa superior sobre o trilho da caixa inferior.

Este conjunto de caixas possui uma garra (Figura 80) que é fixada à base da plataforma através de dois parafusos. Ela é constituída por duas placas de aço com espessura de $\frac{1}{4}$ " (0,64cm) e dimensões de 1,0m de comprimento e 0,10m de largura. Elas são unidas por oito parafusos passantes de $\frac{1}{2}$ " (1,27cm).



Figura 80 - Garra do conjunto 1 de caixas - Versão original.

Embora este conjunto tenha se mostrado satisfatório, foram observadas as seguintes limitações:

- (i) Altura reduzida das caixas de ensaio. A razão $h/D_{\text{máx}}$ (altura da caixa de ensaio/tamanho da maior partícula de solo) sugerida por norma é de 7,0 para o ensaio de rampa e de 5,0 para o ensaio de cisalhamento direto. Isto impede o uso de solos com tamanho maior de grão;
- (ii) Espaçamento fixo das caixas. Não permite o emprego de geossintéticos com mais de 3mm de espessura;
- (iii) Quantidade de solo necessário para se realizar um ensaio elevada;
- (iv) Utilização restrita a ensaios de rampa

Para eliminar estas restrições e estudar novas variáveis, como influência da razão comprimento/altura das caixas de ensaio e tamanho da área de contato, foram projetadas e construídas novas caixas de ensaio.

Os novos conjuntos de caixas de ensaio mantêm algumas características do conjunto antigo, tais como o uso de duas caixas com comprimentos diferentes com o objetivo de manter a área de contato constante e evitar perda de material.

Porém, na sua construção, foram utilizados perfis I de 4 polegadas (10cm), conforme ilustrado na Figura 81, possibilitando o desejável aumento de altura em relação à caixa antiga, e, por conseqüência, o aumento da razão $h/D_{\text{máx}}$.

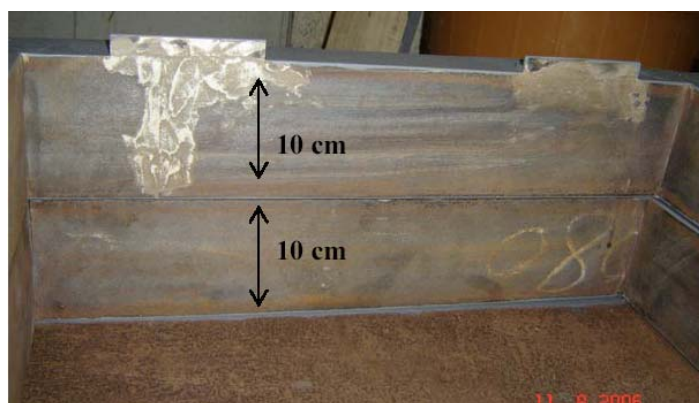


Figura 81 - Caixas de ensaio com altura de 10 cm.

De forma análoga as caixas da versão original, a caixa superior dos novos conjuntos movimenta-se sobre roldanas que correm sobre cantoneiras com aba de 2cm que funcionam como trilhos (Figura 82). Elas fornecem os mesmos benefícios tais como redução de atrito caixa-caixa e restrição do deslocamento lateral da caixa. Entretanto, um aprimoramento foi implementado para possibilitar o controle do espaçamento entre caixas.



Figura 82 - Novo sistema trilho roldana.

O sistema de regulagem de espaçamento é simples (Figura 83). Consiste de uma barra de $\frac{1}{2}$ polegada que passa por uma luva metálica, de mesmo diâmetro interno, e que tem fixo, em uma de suas extremidades, uma roldana com rolamento blindado. A outra extremidade, que passa por dentro da luva, é rosqueada. A regulagem da altura é feita através de duas porcas que giram sobre esta parte rosqueada, sendo que a porca situada na parte inferior da luva ajusta o espaçamento, enquanto a porca superior mantém este espaçamento constante.

Outro melhoramento foi à introdução de um dispositivo que limita o deslocamento da caixa de ensaio (Figura 84). Ele substituiu os pinos de aço usados no primeiro conjunto de caixas. São dois dispositivos, um de cada lado das caixas de ensaio.

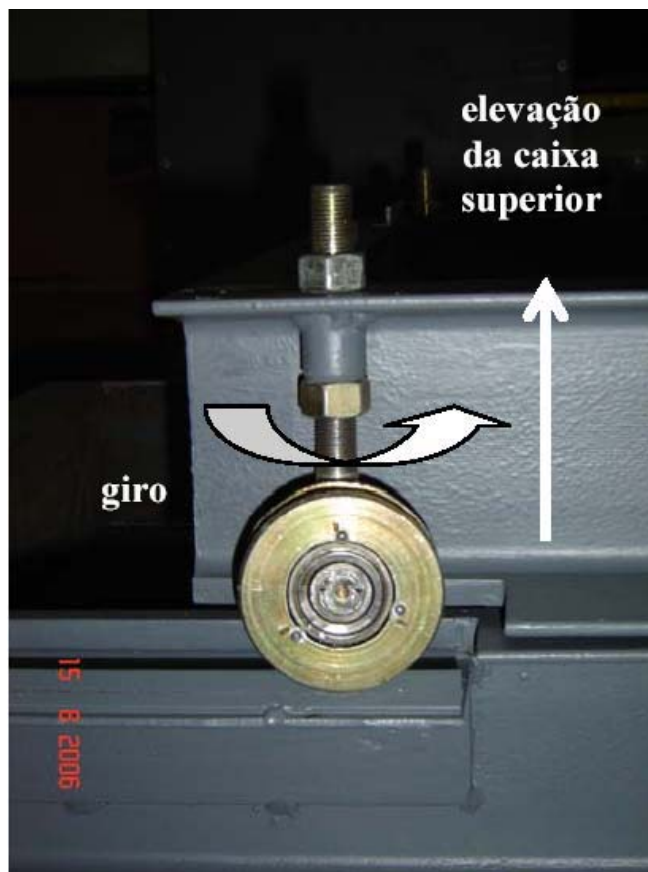


Figura 83 - Sistema de regulagem do espaçamento das caixas de ensaio.



Figura 84 - Limitador de deslocamento (esticado).

Assim, para esta pesquisa, foram desenvolvidos cinco conjuntos de caixas de ensaio. A Tabela 17 apresenta suas características.

Tabela 17 - Características das caixas de ensaio

Conjunto	Caixa de Ensaio	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)
1	caixa superior(1)	100	100	5
	caixa inferior(1)	120	100	5
2	caixa superior	50	50	10
	caixa inferior (2)	120	50	10
3	caixa superior	70	70	10
	caixa inferior	80	70	10
4	caixa superior	100	50	10
	caixa inferior	120	50	10
5	caixa superior	100	100	10
	caixa inferior	120	100	10
6	caixa superior	120	100	30
	caixa inferior	120	100	30

(1) conjunto de caixas de ensaio projetado por Aguiar (2003);

(2) conjunto de caixas número 2 utiliza à mesma caixa inferior do conjunto número 4 com um redutor de comprimento acoplado.

O novo conjunto 2 apresenta uma área de contato constante de $0,25\text{m}^2$ (Figura 76). Conforme a Tabela 17, ele apresenta dimensões nominais de 50 x 50cm, caixa superior, e 70 x 50cm, caixa inferior. A altura das caixas é a altura do próprio perfil I, ou seja, 4 polegadas (aproximadamente 10cm de altura). É importante salientar que a caixa inferior deste conjunto é a mesma do conjunto 4. Porém, para se obter um tamanho compatível, ou seja, 50cm da caixa superior mais 20cm de curso, utilizou-se um redutor de comprimento (Figura 85).

O conjunto 3 tem uma área de contato constante de $0,5\text{m}^2$ (Figura 86), assim como o conjunto 4 (Figura 87). As dimensões das duas configurações estão apresentadas na Tabela 17. A diferença entre elas é que o conjunto 3 tem uma caixa superior quadrada e o conjunto 4 uma caixa retangular. A intenção de se construir caixas de formas diferentes foi a de comparar e estudar uma possível influência da forma da caixa nos resultados dos ensaios.

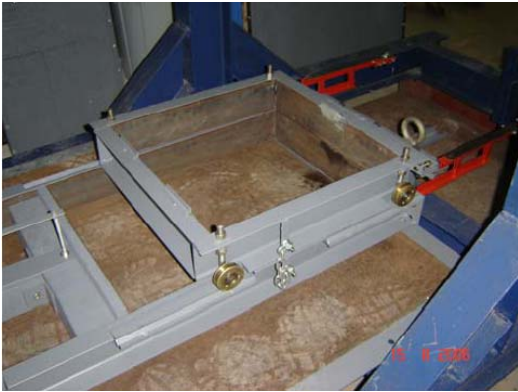


Figura 85 - Conjunto 2 de caixas de ensaio.

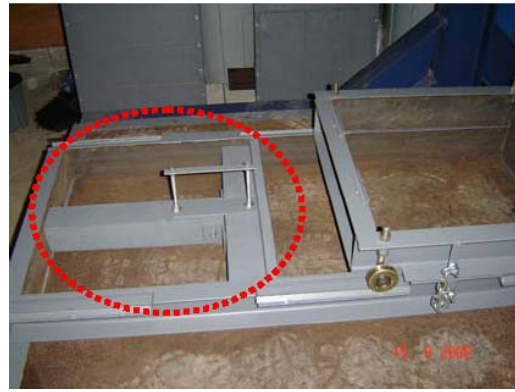


Figura 86 - Detalhe do redutor de comprimento da caixa inferior.



Figura 87 - Conjunto 3 de caixas de ensaio.



Figura 88 - Conjunto 4 de caixas de ensaio.

O conjunto 5 é o maior conjunto de caixas de ensaio de pequena altura (Figura 89). Apresenta uma área de contato constante de 1m^2 , exatamente a mesma do conjunto 1, porém com o dobro da altura e, por consequência, uma maior razão $h/D_{\text{máx}}$.

O conjunto 6 é o maior conjunto de todas as caixas de ensaio (Figura 90) e apresenta uma área de contato constante de $1,2\text{m}^2$.



Figura 89 - Conjunto de caixas de ensaio número 5.



Figura 90 - Conjunto de caixas de ensaio número 6.

Além das caixas, foram construídas novas garras para a fixação de geossintéticos. Elas têm larguras iguais a 10cm e comprimento, compatível com a largura das caixas inferiores de cada um dos conjuntos. A Figura 91 apresenta as garras construídas para a pesquisa.

O conjunto 6 de caixas de ensaio, entretanto, ainda pode usar uma garra móvel (Figura 92). Este garra foi utilizada por Becker (2006) nos seus ensaios de arrancamento de campo.

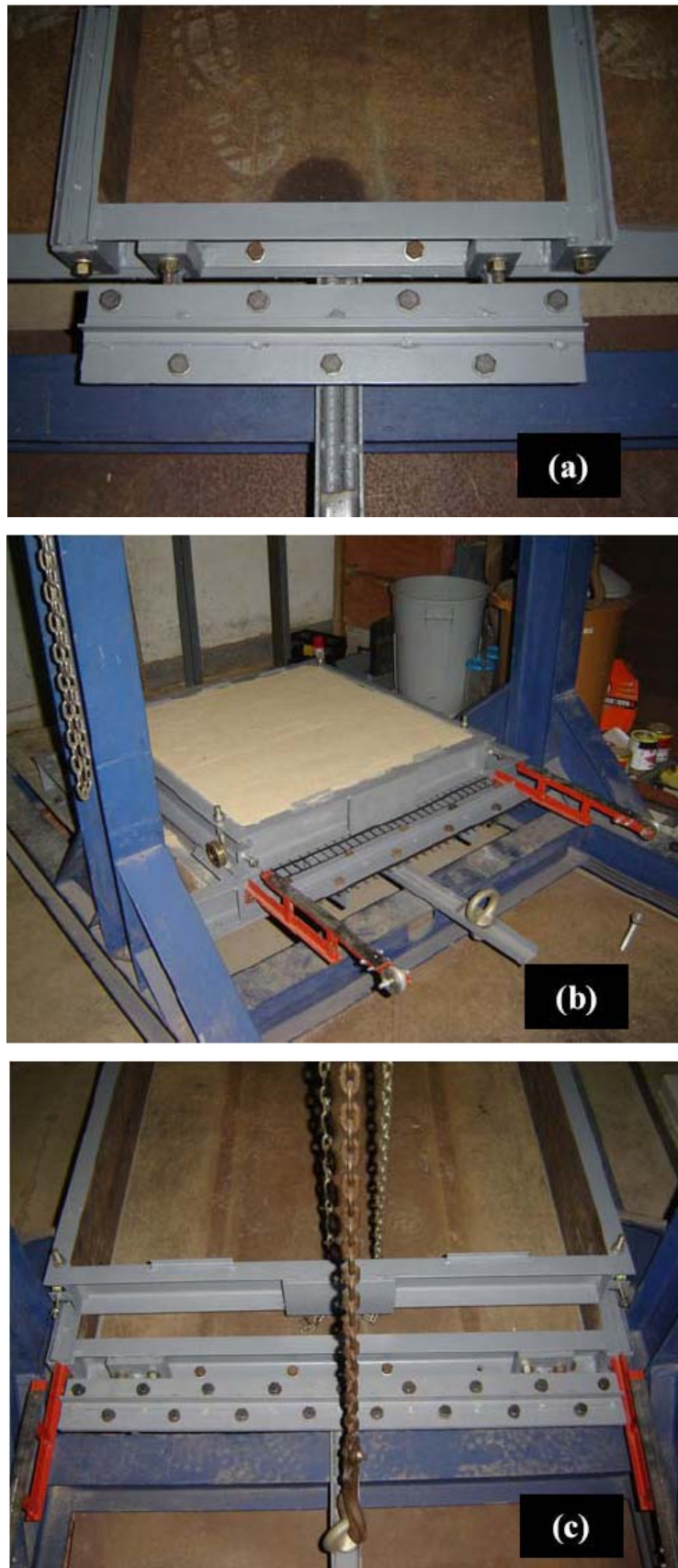


Figura 91 - Garras das caixas de ensaio: (a) garra dos conjuntos de caixas de ensaio 2 e 4, (b) garra do conjunto de ensaio 3 e (c) garra dos conjuntos de caixas ensaio 5 e 6.



Figura 92 - Garra móvel do conjunto 6 de caixas de ensaio (Becker, 2006).

4.3.2. Sistema de Basculamento

As configurações de ensaio de rampa e ensaio de cisalhamento direto inclinado utilizam dispositivo que permite a inclinação da plataforma de ensaio. Denominou-se a esse dispositivo de sistema de basculamento.

O mecanismo de basculamento é simples, sendo composto por um sistema de polias e correntes (talha), fixado no centro do pórtico (Figura 93a). A corrente é ancorada na base da rampa, sobre um dos perfis U que enrijece a base e prolonga-se por 70cm na parte inferior (Figura 93b). A capacidade máxima de içamento do sistema é de 10kN.

4.3.3. Sistema de Aplicação de Força Normal

O sistema de confinamento que será empregado nos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado, para baixas tensões confinantes, é composto por uma tampa mista de madeira e aço com dimensões compatíveis com as caixas superiores de cada uma dos conjuntos de caixas de ensaios (Figura 94). Este sistema é denominado de sistema de aplicação direta.

Sobre estas tampas são assentadas placas de aço com dimensões de 30 x 30cm com altura de 2,54cm, 35 x 35cm com altura de 5,08cm ou 40 x 40cm com 2,54cm de altura. Elas pesam individualmente 18, 35 e 28kg, ou seja, 0,18, 0,35 e 0,28kN, respectivamente. (Figuras 95a e b). Estas placas são presas à tampa por meio de dois parafusos passantes que unem todo o conjunto.

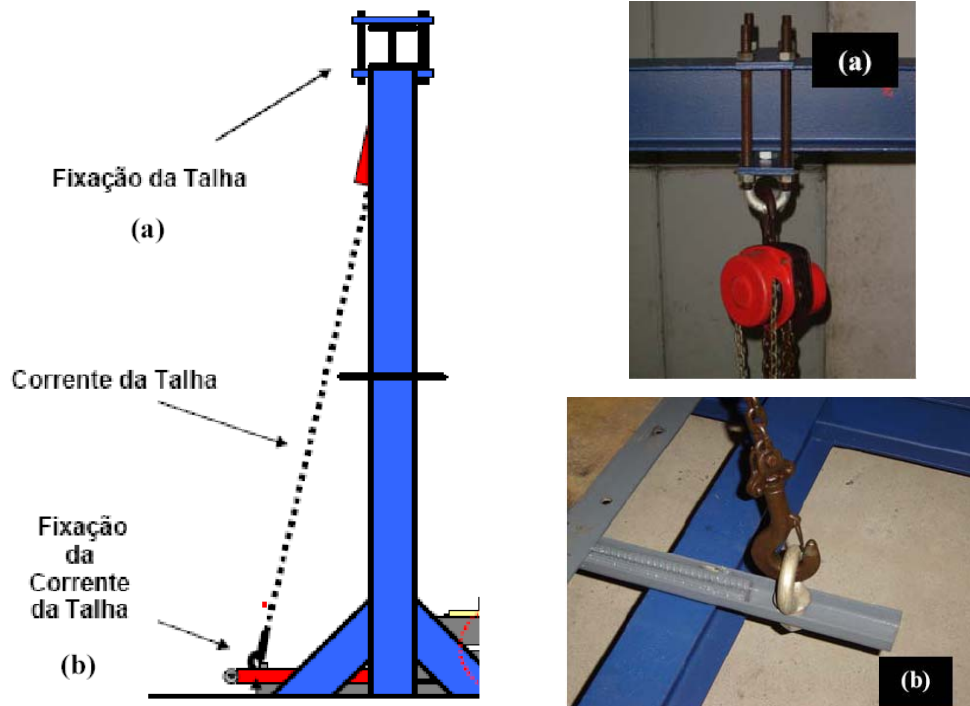


Figura 93 - Sistema de Basculamento: (a) Detalhe da fixação da talha e (b) Detalhe da fixação da corrente da talha.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

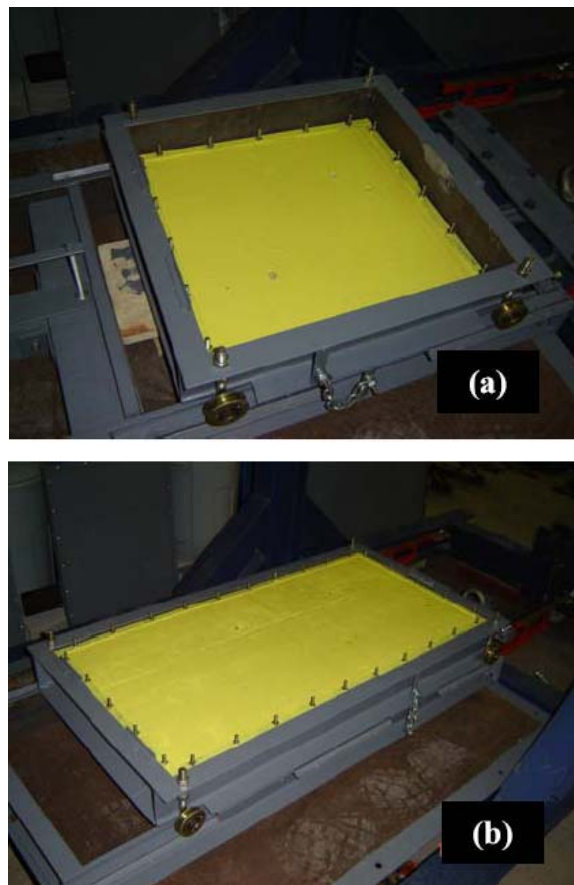


Figura 94 - Tampas do sistema de confinamento. (a) caixa superior do conjunto 2 e (b) caixa superior do conjunto 4.

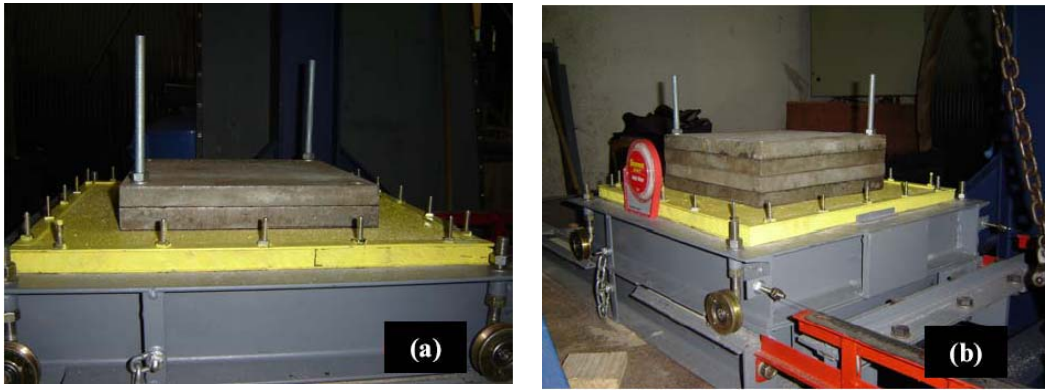


Figura 95 - Sistema de confinamento dos ensaios de Rampa e Cisalhamento Direto Inclinado. (a) Ensaio de rampa com tensão confinante de 3,3kPa e (b) Ensaio de rampa com tensão confinante de 4,7kPa.

A distribuição e a quantidade de placas sobre as tampas fornece a tensão normal do ensaio, calculada da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{(w + p_{\text{tampa}} + p_{\text{placa}})}{A} \quad (10)$$

onde:

A = área da tampa (m^2);

p_{tampa} = peso da tampa de confinamento (kN);

p_{placa} = somatório dos pesos das placas de ensaio (kN);

w = peso do solo.

σ = tensão normal (kPa);

A configuração de caixas de ensaio do conjunto 2 tem uma única pilha de placas sobre a tampa de confinamento (Figuras 95a e b). Porém, para as demais configurações, o número de pilhas aumenta com a área. Por exemplo, a configuração de caixas do conjunto 4 utiliza duas pilhas de placas (Figura 96) para se conseguir a mesma tensão normal de 3,3kPa da configuração do conjunto 2, pois tem o dobro da área. Para as demais configurações, tem-se 4 pilhas de placas de aço manutenção da mesma relação.



Figura 96 - Ensaio de rampa sob tensão confinante de 3,3kPa.

Este sistema é eficiente, porém apresenta algumas restrições operacionais. Conforme a rampa de ensaio vai sendo basculada o centro de gravidade do conjunto de confinamento se desloca em relação ao seu centro geométrico. No limite, ocorre a perda de confinamento na extremidade traseira da caixa superior, devido à tendência de tombamento das placas de aço.

Desta forma, o Item 4.6 (Limitações de Uso) apresenta uma análise para determinação do limite de inclinação da rampa sem a ocorrência de tombamento. Esta análise se aplica aos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado.

O segundo sistema de aplicação de tensão normal é o sistema de confinamento por pendural e destina-se aos ensaios de cisalhamento direto convencional. Ele se assemelha ao do ensaio de cisalhamento direto convencional de pequenas dimensões, como pode ser observado nas Figuras 97 e 98.

Ele é composto por uma placa de reação de $\frac{1}{2}$ polegada (1,27cm) de espessura e dimensões compatíveis com as caixas superiores de ensaio (Figura 99). Ela é reforçada por barras chatas de 2 polegadas (5,08cm) em forma de dupla

cruz, sobre as quais é soldada uma nova placa de $\frac{1}{2}$ polegada (1,27cm) de espessura com dimensões de 20 x 20cm.

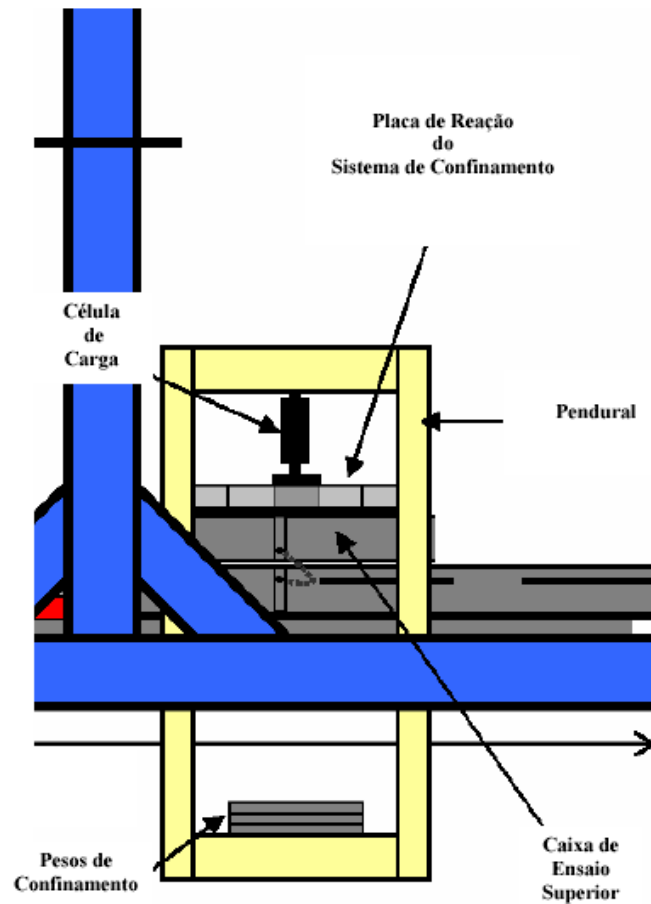


Figura 97 - Vista lateral do sistema de confinamento do ensaio de cisalhamento direto convencional.

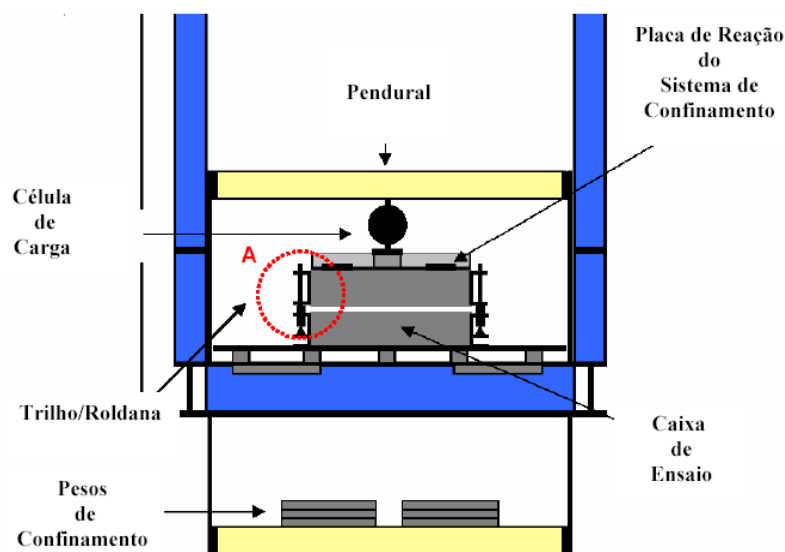


Figura 98 - Vista frontal do sistema de confinamento do ensaio de cisalhamento direto convencional

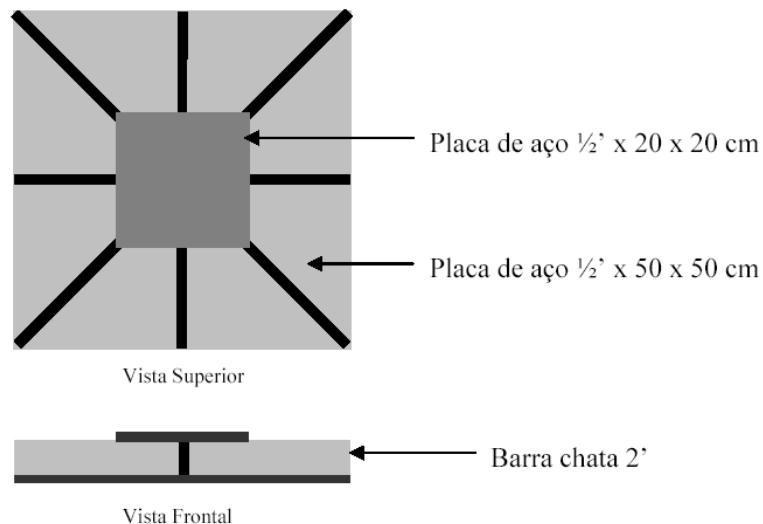


Figura 99 - Placa de reação para a o conjunto de caixa superior do conjunto 2.

Sobre esta placa superior situa-se o ponto de reação da célula de carga do sistema de confinamento (Figura 100). É importante salientar que, da mesma forma que no ensaio de cisalhamento convencional de pequenas dimensões, este ponto é uma rótula e não um ponto rígido.

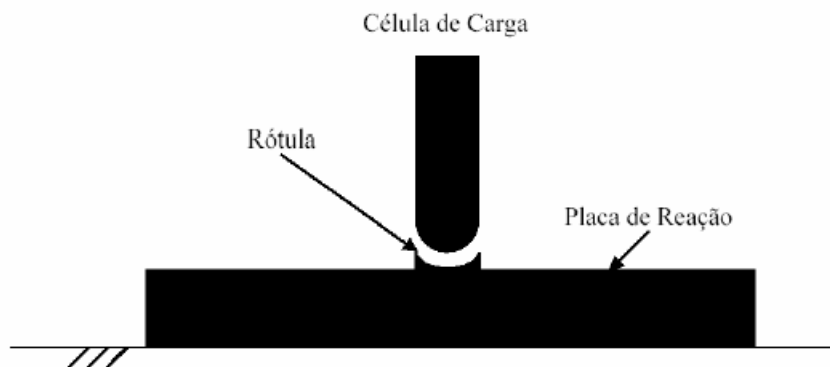


Figura 100 - Detalhe da rótula do ponto de reação.

Sobre este ponto é colocado um conjunto que contém a célula de carga e o pendural (Figuras 97 e 98). O pendural é uma estrutura de aço composta por perfis I de 4" (10cm) soldados. Nesta estrutura são fixadas quatro barras, locadas no espaço entre a plataforma e a base do equipamento, até a parte inferior da estrutura (Figura 98).

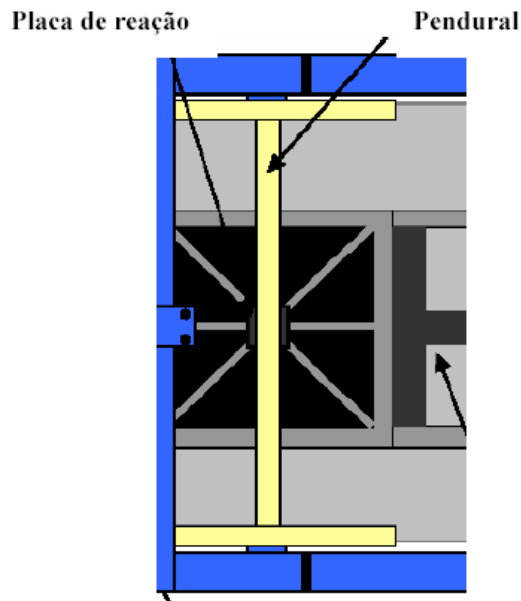


Figura 101 - Vista superior do pendural de carga.

As barras se ligam a uma base de carga sobre a qual são depositados os pesos de confinamento (Figura 98). O limite de carga sobre esta plataforma é de 19,6kN, ou seja, uma tensão confinante de máxima de 80kPa, para configuração de caixas do conjunto 2, e de 40kPa para a configuração de caixas conjunto 3.

O terceiro sistema proposto é o de bolsa de ar, destinado aos ensaios de arrancamento, cisalhamento direto e cisalhamento direto com reforço inclinado. A bolsa proposta seria baseada na experiência da COPPE com este tipo de material. Elas seriam construídas em PVC cinza, conhecidas como “*manton*” e teriam dimensões internas compatíveis com o conjunto 6 de caixas de ensaio. A carga nominal seria em torno de 100kPa. Maiores detalhes deste sistema consultar são apresentados por Saramago (2002).

4.3.4. Sistema de Aplicação de Força Cisalhante

Denomina-se de sistema de aplicação de tensões cisalhante ao conjunto de equipamentos e estruturas associadas que impõe força cisalhante aos conjuntos de caixas de ensaio. O primeiro sistema destina-se aos ensaios de cisalhamento direto inclinado.

Ele consiste de dois cabos de aço de $\frac{1}{4}$ de polegada (0,64cm) que tem uma de suas extremidades fixa na caixa de ensaio superior e a outra presa a uma

plataforma de madeira revestida com aço, formando um conjunto único. Os cabos passam sobre duas roldanas que tem por função transmitir os esforços dos pesos até a extremidade posterior da caixa superior em qualquer inclinação da plataforma de ensaio. Estes pesos têm seus valores conhecidos, sendo os mesmos do ensaio de cisalhamento convencional de pequenas dimensões (Figuras 102a e b).



(a)



(b)

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.

O valor da tensão cisalhante aplicada vai ser o somatório dos pesos acumulados sobre a plataforma de madeira, em kN, dividida pela área de contato solo-geossintético. No Item 4.5 (Testes Preliminares) é apresentado o limite de utilização deste sistema.

O segundo se destina aos ensaios de cisalhamento direto convencional e cisalhamento com reforço inclinado. É constituído por um conjunto marca hidráulico Enerpac (Figura 103), composto por um macaco hidráulico com capacidade de 12 ou 25ton, bomba, manômetro e mangueiras, associado a uma célula de carga.



(a)



(b)

Figura 103 - Conjunto hidráulico Enerpac.

Todo este conjunto é fixo em um pórtico de carga conforme Figura 104. Este pórtico é constituído de perfis I (4" ou 10cm) soldados e dimensionado para resistir aos esforços solicitantes. Ele apresenta duas posições para fixação do sistema de aplicação de tensão cisalhante. A primeira se destina às caixas de ensaio com 10cm de altura e a segunda às caixas de ensaio com 30cm de altura.

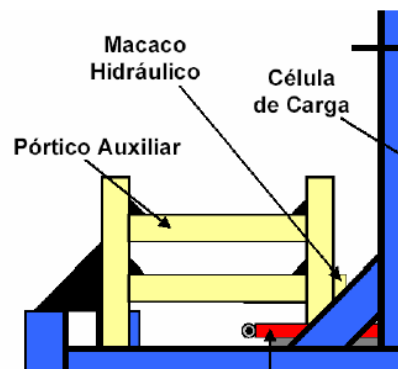


Figura 104 - Detalhe do sistema de aplicação de tensão cisalhante.

O terceiro sistema é utilizado nos ensaios de arrancamento. Ele é composto por um pórtico de carga constituído de perfis I (4" ou 10cm) soldados e dimensionado para resistir aos esforços solicitantes. Nele é fixo o macaco hidráulico que aplica as tensões de arrancamento (Figura 105). Ele emprega os mesmos macacos Enerpac citados anteriormente.

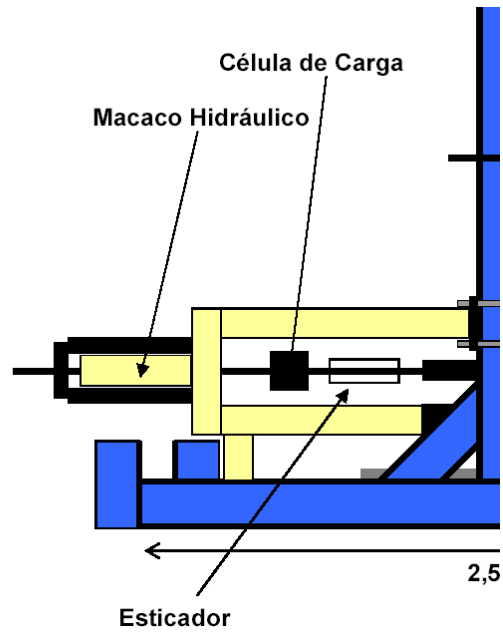


Figura 105 - Detalhe do sistema de arrancamento.

4.3.5. Instrumentação

As grandezas mensuradas durante os ensaios são deslocamentos horizontais, ângulo de inclinação de rampa, força normal e força cisalhante.

Os ângulos de rampa foram monitorados por um medidor de ângulo mecânico com base magnética marca Starrett com precisão de $0,5^\circ$ (106). Este dispositivo é fixado na lateral da caixa, mais precisamente, na borda da caixa de ensaio (Figura 107).



Figura 106 - Medidor de ângulo de rampa com base magnética.



Figura 107 - Posição do medidor na borda da caixa.

Os deslocamentos horizontais podem ser monitorados através de dois tipos de dispositivos: medidor de deslocamento mecânico tipo *tell-tale* ou LVDT.

O primeiro dispositivo foi empregado nos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado. Este instrumento, simples e eficiente, é composto por uma linha metálica, com uma extremidade presa na caixa superior (Figura 108). Na outra extremidade é pendurado um peso de 100g. A linha metálica é suportada por uma roldana fixa na extremidade de uma pequena estrutura de aço, sobre a qual é ajustada uma régua metálica de 30cm (Figura 109). Um pequeno amassador dobrado é fixado na linha metálica para servir como referência para fazer as leituras. A precisão do *tell-tale* é de 0,5mm. São empregados dois dispositivos nos ensaios, um em cada extremidade da caixa superior .



Figura 108 - Fixação do *tell-tale* na caixa superior.



Figura 109 - Dispositivo do tipo *tell-tale*.

Os LVDT's são da marca Gefran, modelo LT-M-0100-S, com 90mm de curso (Figura 110). Eles são fixados sobre a estrutura dos *tell-tales*.



Figura 110 - Medidor de deslocamento horizontal marca Gefran.

Para medir as cargas atuantes foram propostos dois tipos de instrumentos: manômetros e /ou células de carga. O manômetro é da marca Enerpac, modelo G2535L, com capacidade de 700Bar ilustrado na Figura 111a. As células de carga da marca Kratos, tipo KCL, têm capacidade de 50kN (Figura 111b).



(a)

(b)

Figura 111 - Instrumentos para a medição de cargas: (a) manômetro Enerpac e (b) célula de carga Kratos.

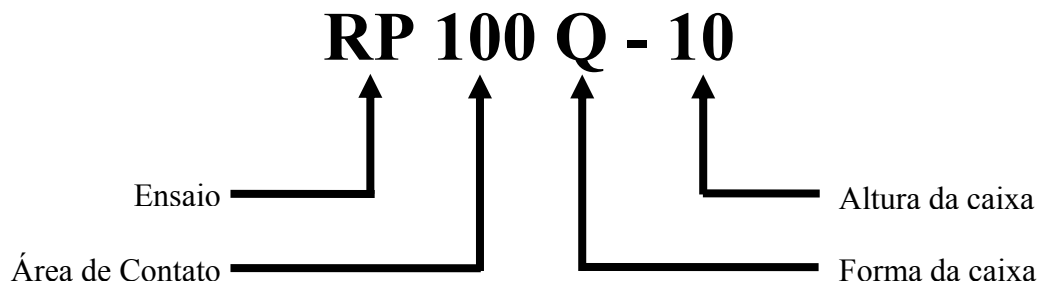
As medidas de todos os instrumentos eletrônicos são registradas através de sistema de aquisição de dados acoplado a um computador.

4.4. Configurações de Ensaio

A combinação dos diferentes acessórios dá origem às configurações de ensaio propriamente ditas. No caso desta pesquisa serão utilizadas 5 configurações de ensaio de rampa e 3 configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado. É importante ressaltar que ensaios de cisalhamento direto convencionais poderão ser realizados utilizando as configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado com a plataforma de ensaio na horizontal (zero graus).

Entretanto foram projetadas, também, configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional e arrancamento.

De modo a facilitar a identificação de cada uma das configurações de ensaio, foi adotada a seguinte convenção:



onde:

ensaio:	RP	Ensaio de rampa
	CC	Ensaio de cisalhamento direto convencional
	CI	Ensaio de cisalhamento direto inclinado
	AR	Ensaio de arrancamento

área de contato:	25	Área de contato de 0,25m ²
	50	Área de contato de 0,50m ²
	100	Área de contato de 1,00m ²

forma da caixa:	Q	Caixas de ensaio quadradas
	R	Caixas de ensaio retangulares

altura da caixa:	5	5cm de altura máxima da caixa de ensaio
	10	10cm de altura máxima da caixa de ensaio
	30	30cm de altura máxima da caixa de ensaio

4.4.1. Ensaio de Rampa

Foram construídas quatro configurações de ensaio de rampa. Elas diferenciam-se pelo tamanho, forma da área de contato e altura das caixas. Estas configurações são obtidas através da combinação dos diferentes acessórios descritos anteriormente. A Tabela 18 resume as características de cada uma das configurações de ensaio de rampa. Para facilitar a compreensão elas serão denominadas: RP25Q-10, RP50Q-10, RP50R-10, RP100Q-5 e RP100Q-10. A

configuração RP100Q-5 foi desenvolvida por Aguiar (2003) e é apresentada para fins de comparação.

Tabela 18 - Resumo das características das configurações de ensaio de Rampa

Características		Configuração de Ensaio				
		RP25Q-10 (Fig. 112)	RP50Q-10 (Fig. 113)	RP50R-10 (Fig. 114)	RP100Q-5 (Fig. 115)	RP100Q-10 (Fig. 116)
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	0,80	1,20	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	0,50	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	0,70	1,00	1,00	1,00
	largura (m)	0,50	0,70	0,50	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	0,50	1,00	1,00
Inclinação das faces frontal e de fundo da caixa de ensaio superior	V (0°)	sim	sim	sim	sim	sim
	I (30°)	sim	não	sim	não	não



Figura 112 - Configuração RP25Q-10.



Figura 113 - Configuração RP50Q-10.



Figura 114 - Configuração RP50R-10.



Figura 115 - Configuração RP100Q-5.



Figura 116 - Configuração RP100Q-10.

Cada uma das configurações de ensaio desenvolvidas apresenta suas particularidades, entretanto, de uma forma geral, elas têm sempre a mesma disposição (Figuras 117, 118 e 119).

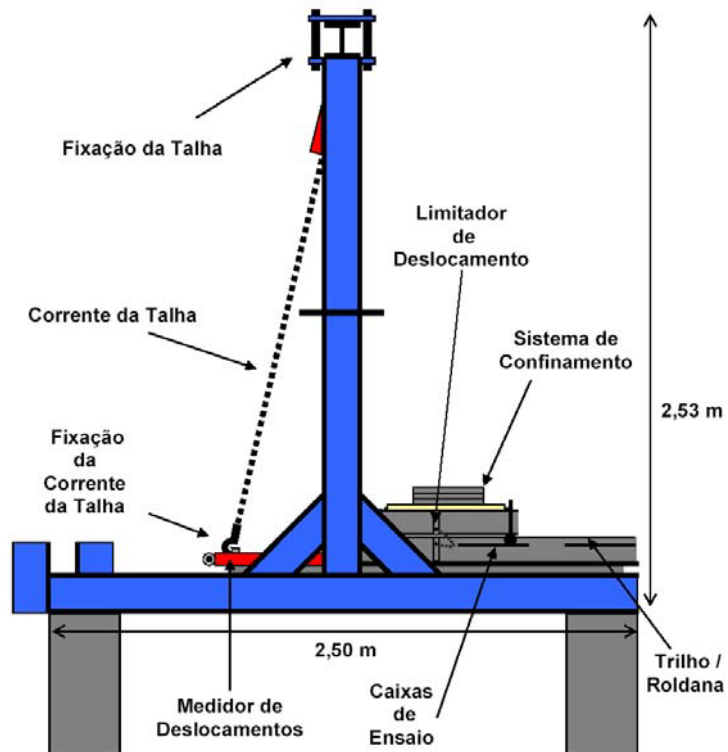


Figura 117 - Vista lateral da configuração de ensaio de rampa.

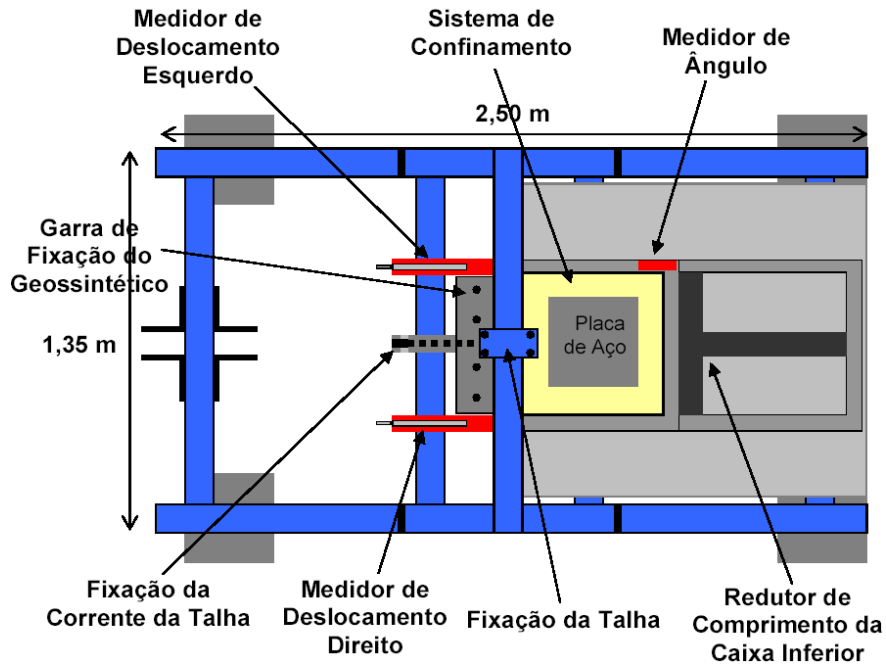


Figura 118 - Vista superior da configuração de ensaio de rampa.

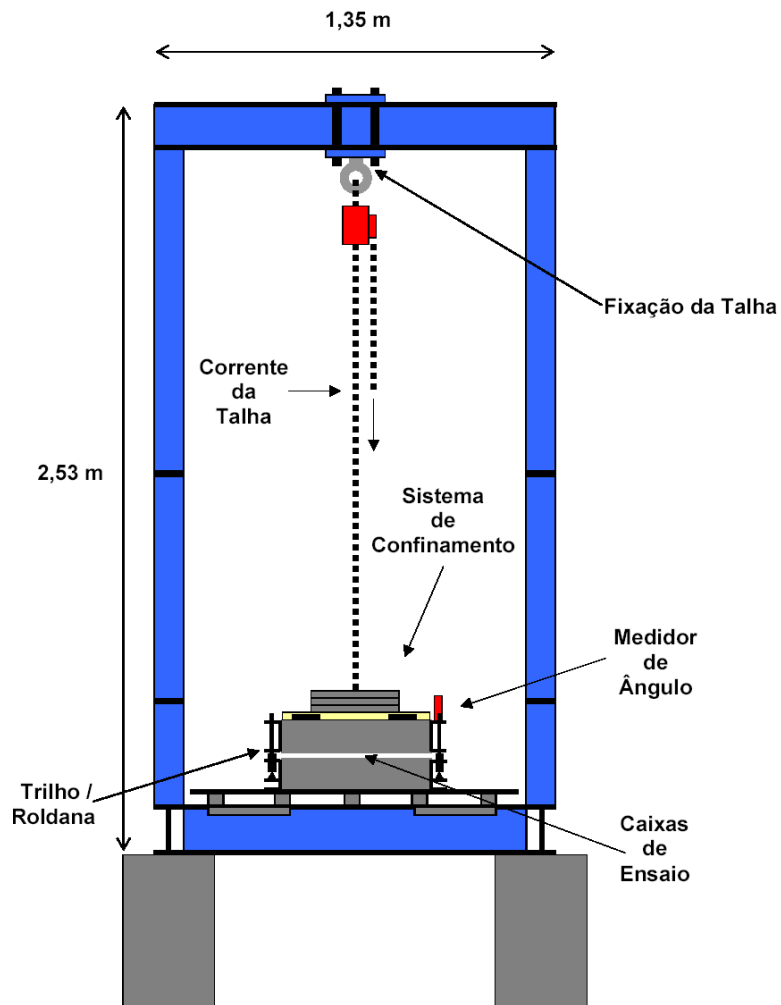


Figura 119 - Vista frontal da configuração de ensaio de rampa.

Observar-se que, independente da configuração de ensaio, existem sempre dois medidores de deslocamento horizontal posicionados nas extremidades das caixas superiores de ensaio e um medidor de ângulo situado em uma das bordas da extremidade anterior da caixa. O sistema de confinamento é sempre por gravidade e de aplicação direta, composto por placas de aço que ficam sobre uma tampa mista de madeira e aço.

São sempre duas caixas de ensaio com alturas iguais a 5 ou 10cm, dependendo da configuração. Nas configurações de ensaio RP25Q-10 e RP50R-10 é possível variar a altura útil das caixas utilizando-se um fundo falso (Figura 120). Desta forma, para estas configurações, estão disponíveis alturas internas de 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 cm.



(a) Configuração RP25Q-10 com altura reduzida para 5cm.



(b) Detalhe da caixa



Caixa Superior

Caixa Inferior

(c) Esquema lateral da RP25Q-10 com altura interna das caixas reduzida para 5cm. A cor clara representa o solo, a cor escura o calço utilizado para reduzir a altura e a cor cinza representa os vazios.



Caixa Superior

Caixa Inferior

(d) Esquema lateral da RP50R-10 com altura interna das caixas reduzida para 5cm. A cor clara representa o solo, a cor escura o calço utilizado para reduzir a altura e a cor cinza representa os vazios.

Figura 120 - Configurações de ensaio com caixas com altura reduzida.

Os ensaios de rampa podem ser realizados com as faces, frontal e traseira, da caixa superior de ensaio na vertical ou com as faces inclinadas de 30° com a

vertical, conforme recomendação da norma ISO 12957-2. Esta possibilidade é disponível para as configurações RP25Q-10 e RP50R-10 (Figura 121).

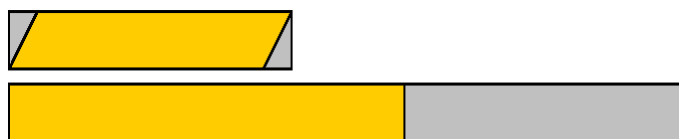


Figura 121 - Vista lateral da configuração RP25Q-10 com faces inclinadas a 30 graus.

No Apêndice I estão às três vistas (frontal, lateral e superior) de cada uma das configurações de ensaio de rampa e suas características.

4.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

O ensaio de cisalhamento direto inclinado é uma derivação do ensaio de rampa e dele foram habilitadas três configurações de ensaio. Assim como no ensaio de rampa, as configurações de ensaio de cisalhamento inclinado são diferenciadas pela área de contato. A Tabela 19 resume as características. Para facilitar a compreensão elas serão denominadas: CI25Q-10, CI50Q-10 e CI100Q-10.

Tabela 19 - Resumo das características das configurações de ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

Características		Configuração de Ensaio		
		CI25Q-10 (Fig. 122)	CI50R-10 (Fig. 123)	CI100Q-10 (Fig. 124)
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,50	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	1,00	1,00
	largura (m)	0,50	0,50	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	1,00
Inclinação das faces frontal e de fundo da caixa de ensaio superior	V (0°)	sim	sim	sim
	I (30°)	sim	sim	não



Figura 122 - Configuração CI25Q-10.



Figura 123 - Configuração CI50R-10.



Figura 124 - Configuração CI100Q-10.

De uma forma geral as configurações de cisalhamento direto inclinado apresentam a seguinte disposição (Figuras 125 a 127).

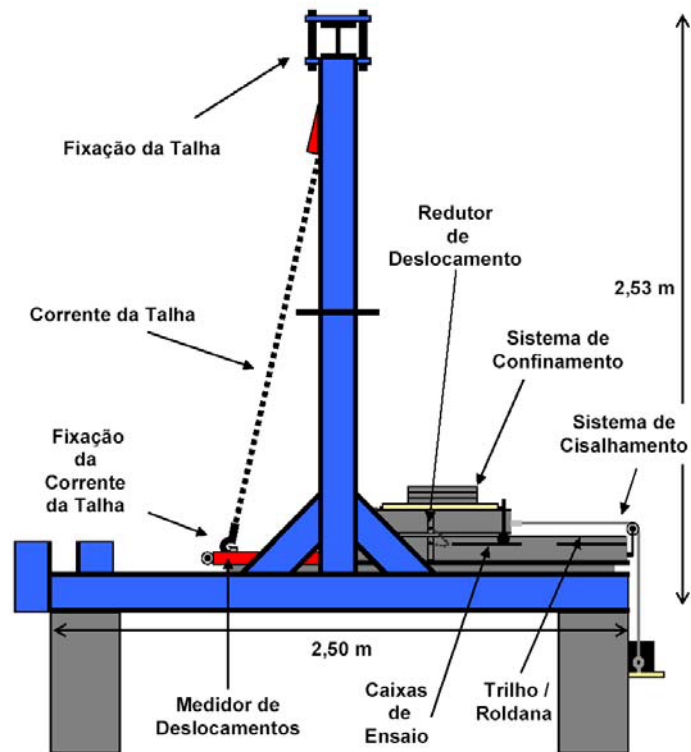


Figura 125 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto inclinado.

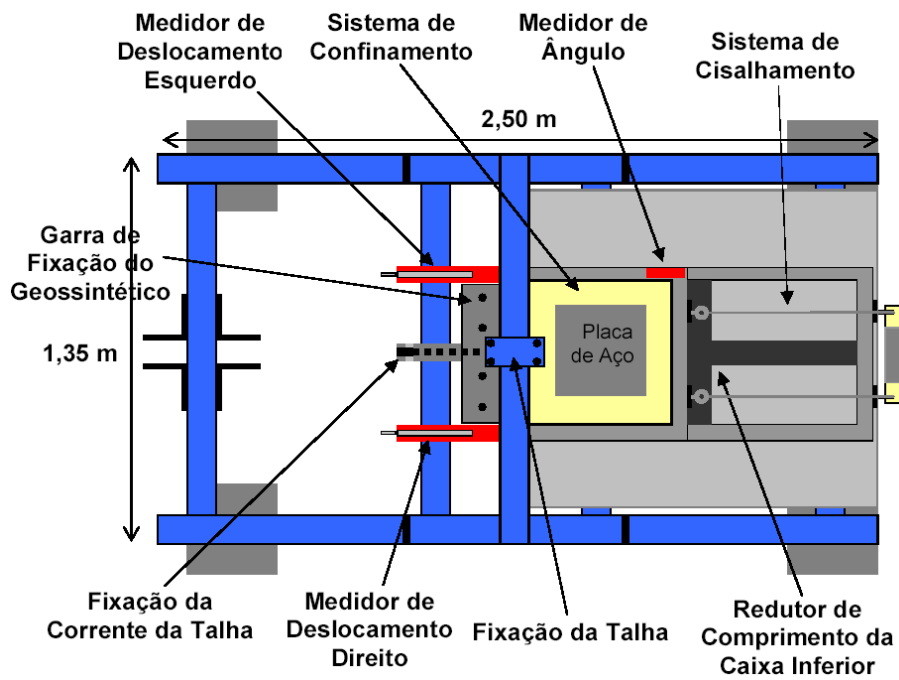


Figura 126 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto inclinado.

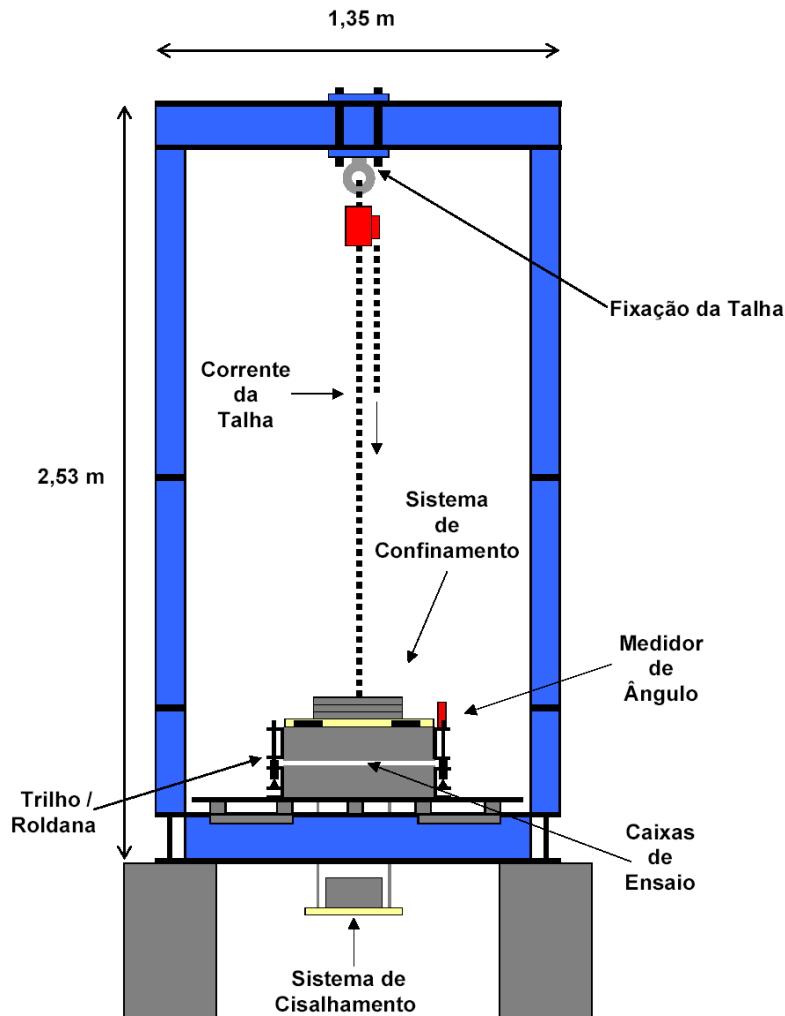


Figura 127 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto inclinado.

O sistema para ensaio de cisalhamento inclinado, assim o ensaio de rampa, apresenta as mesmas características, tais como dois medidores de deslocamento horizontal, medidor de ângulo, caixas de ensaio com altura de 10cm, regulagem da altura útil das caixas utilizando-se fundo falso e inclinação ou não das faces de frente e fundo da caixa superior de ensaio.

A diferença entre os ensaios de rampa e de cisalhamento inclinado reside na incorporação de um sistema de aplicação de força cisalhante no último. Este sistema simples consiste de um conjunto de cabos de aço, roldanas, plataforma de cargas e pesos que induz uma força cisalhante na caixa de ensaio superior (Item 4.3.4).

O Apêndice II apresenta as vistas frontal, lateral e superior de cada uma das configurações de ensaio de cisalhamento inclinado e as suas características.

4.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Foram projetadas e parcialmente construídas quatro configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional. Estas configurações diferenciam-se, pelo tamanho da área de contato, forma da área de contato, altura das caixas de ensaio e sistema de aplicação de tensão confinante. Tabela 20 resume as características de cada uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 20 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional

Características		Configuração de Ensaio			
		CC25Q-10	CC50Q-10	CC100Q-10	CC120R-30
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	0,80	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,30
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	0,70	1,00	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,70	0,10	0,30
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	1,00	1,20
Sistema de Aplicação de Carga Confinante	Direta	sim	sim	sim	sim
	Pendural	sim	sim	não	não
	Bolsa de Ar	não	não	não	sim

As Figuras 128 a 130 apresentam as configurações CC25Q-10 e CC50Q-10, que apresentam a mesma disposição. A configuração CC100Q-10 é apresentada nas Figuras 131 a 133 e a configuração CC120R-30 nas Figuras de 134 a 136.

Independente da configuração de ensaio existe sempre dois medidores de deslocamento horizontal posicionados nas extremidades da caixa superior. A aplicação de força cisalhante é sempre por macaco hidráulico e seu valor é mensurado através de uma célula de carga. A velocidade de cisalhamento vai depender do tipo de solo ensaiado. A configuração CC25Q-10 pode ter a altura útil das caixas reguladas utilizando o mesmo fundo falso empregado nos ensaios de rampa.

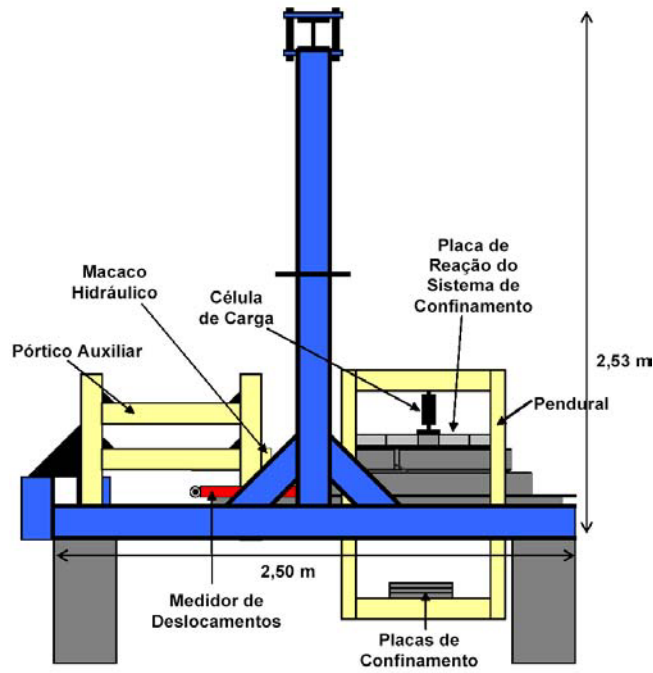


Figura 128 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

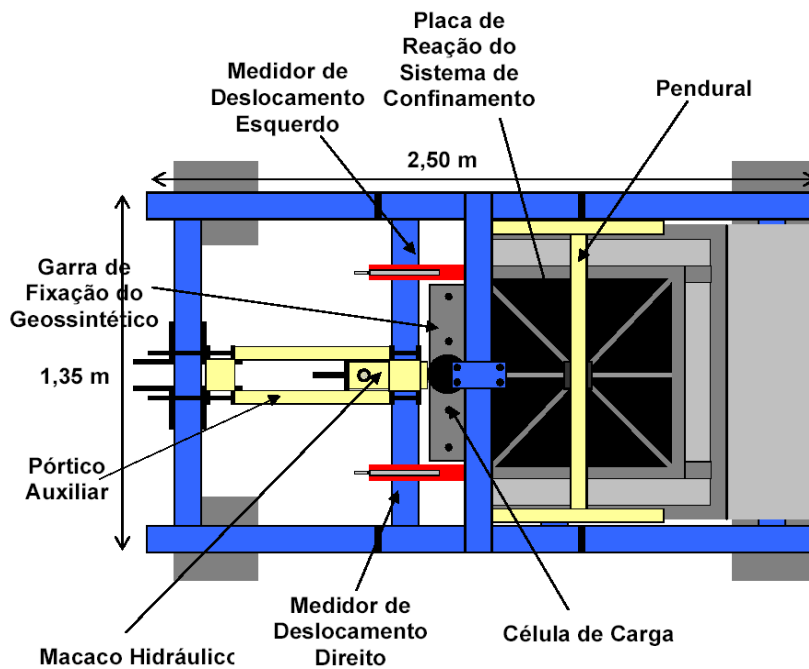


Figura 129 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

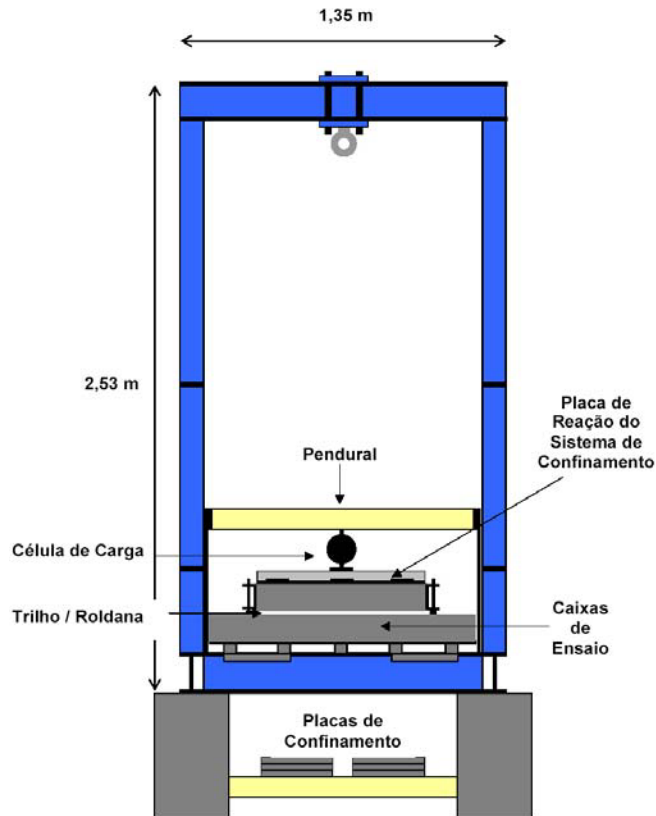


Figura 130 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

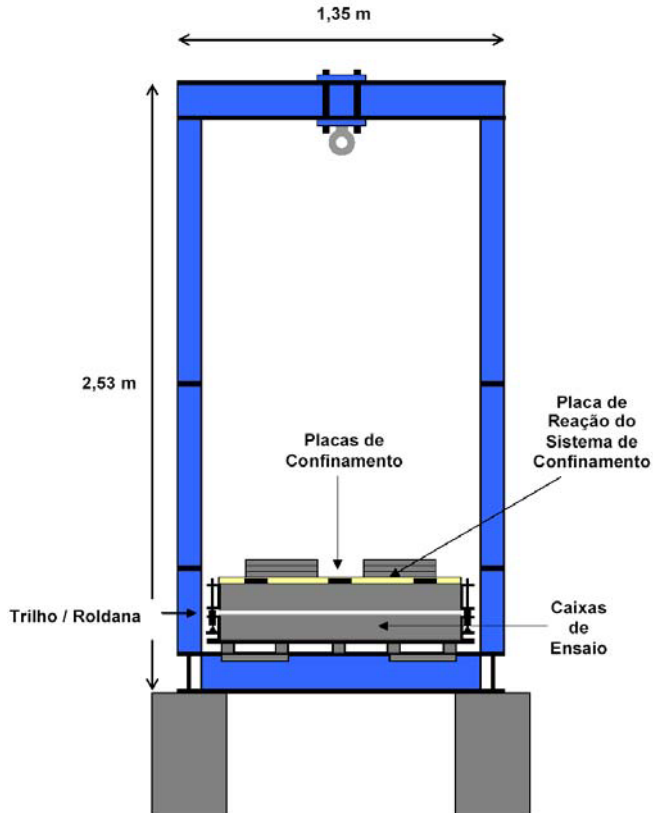


Figura 131 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC100Q-10.

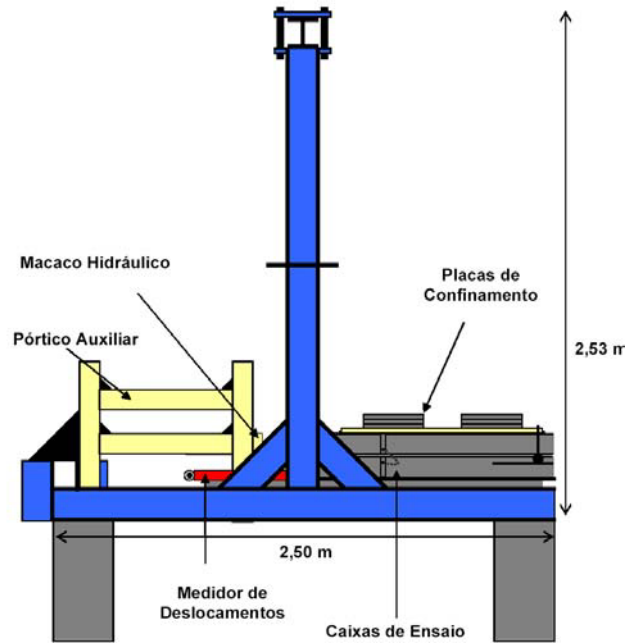


Figura 132 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

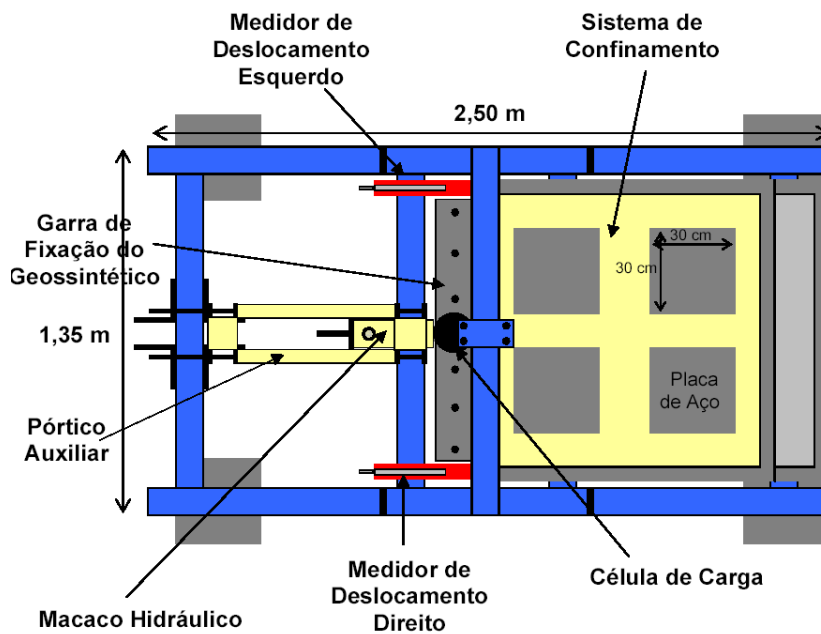


Figura 133 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

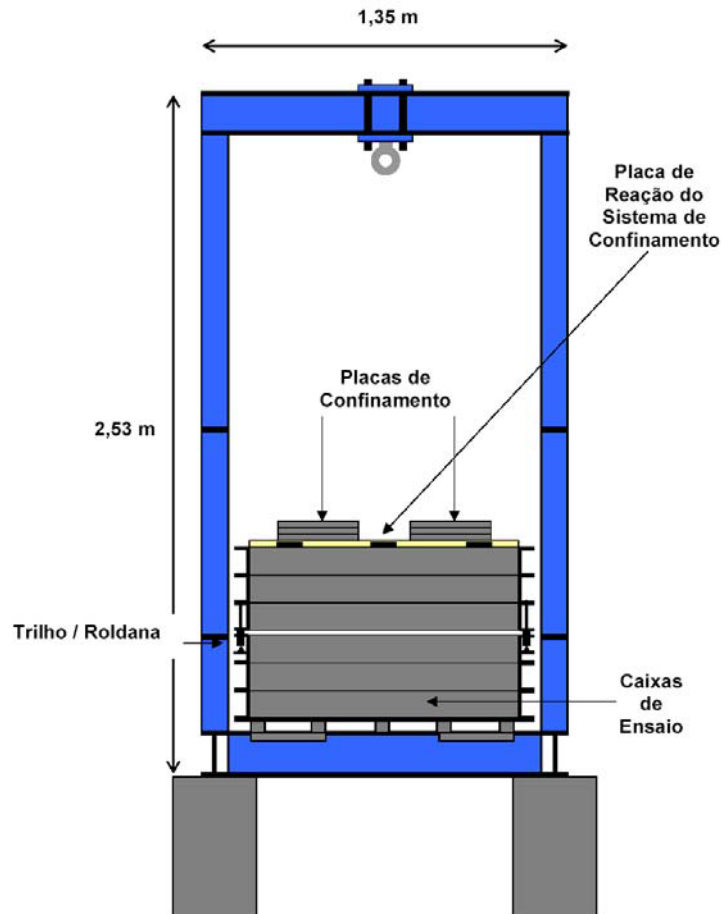


Figura 134 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

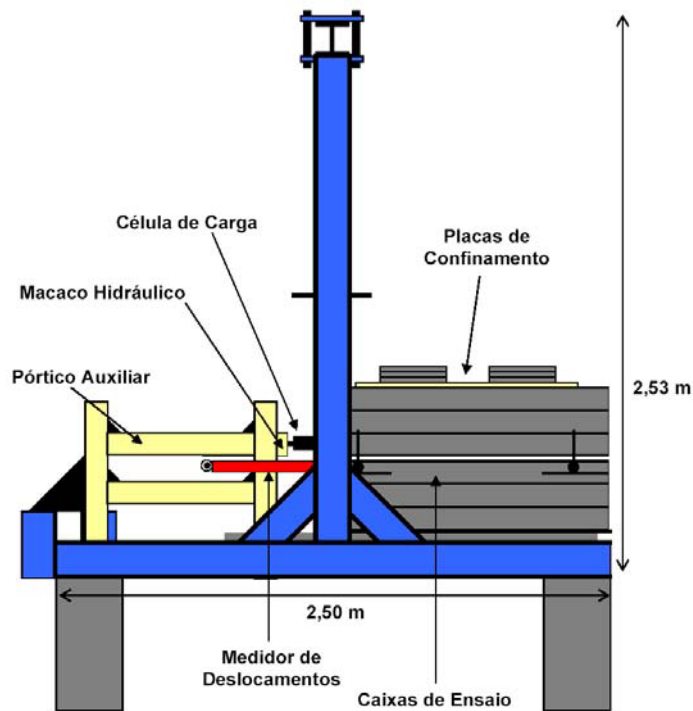


Figura 135 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30

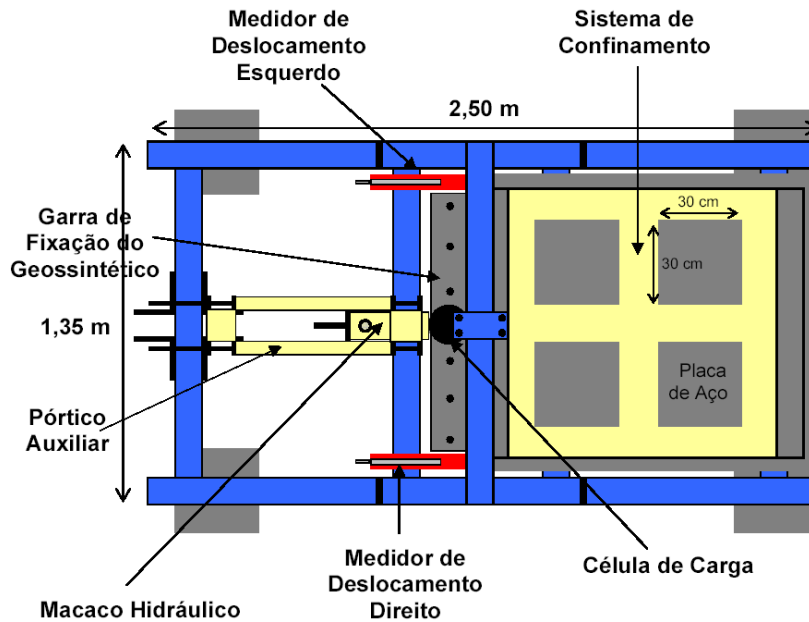


Figura 136 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

É importante salientar que a configuração de ensaio de cisalhamento direto CC120R-30 foi planejada para realizar ensaios de cisalhamento direto convencional e ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. As possibilidades de disposição dos geossintéticos e configurações das caixas são apresentadas na Figuras 137.

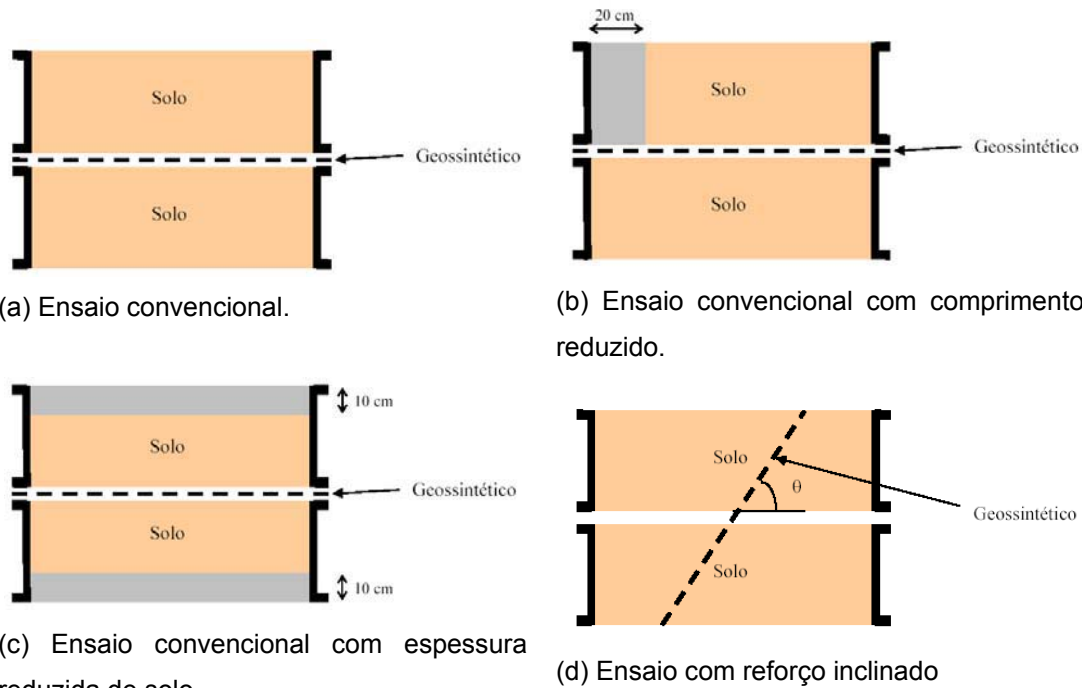


Figura 137 - Configurações das caixas e posicionamento do geossintético em ensaios de cisalhamento direto.

No Apêndice III estão às três vistas (frontal, lateral e superior) de cada uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto propostas neste trabalho.

4.4.4. Ensaio de Arrancamento

Foi projetada e parcialmente construída uma configuração para ensaio de arrancamento. A Tabela 21 resume as características deste ensaio a ser executado em amostras de grandes dimensões com área de contato de $1,0\text{m}^2$. Vale ressaltar que esta configuração é proposta para posterior habilitação do equipamento, a ser realizada por pesquisas posteriores.

Tabela 21 - Resumo das características das configurações de ensaio de arrancamento

Características	Configuração de Ensaio	
	AR120R-30	
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	1,20
	largura (m)	1,00
	altura (m)	0,30
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	1,20
	largura (m)	1,00
	altura (m)	0,30
	área de contato (m^2)	1,20

A configuração de ensaio apresenta dois medidores de deslocamento horizontal posicionados na frente da caixa de ensaio para medir o deslocamento da garra. Além disso, na extremidade posterior da caixa de ensaio, existe um quadro de medidores de deslocamento que tem por finalidade medir as deformações da manta de geossintético.

A aplicação de força cisalhante é sempre por macaco hidráulico e seu valor é mensurado através de uma célula de carga. A velocidade de arrancamento é sempre baixa, sendo sugerido o valor de $1\text{mm}/\text{min}$. Pode ser utilizados os sistemas de aplicação de carga de confinante de aplicação direta (baixas tensões confinantes) e por bolsa de ar (médias tensões confinantes).

A configuração geral do ensaio de arrancamento é apresentada nas Figuras 138 a 140 detalhadas no Apêndice IV.

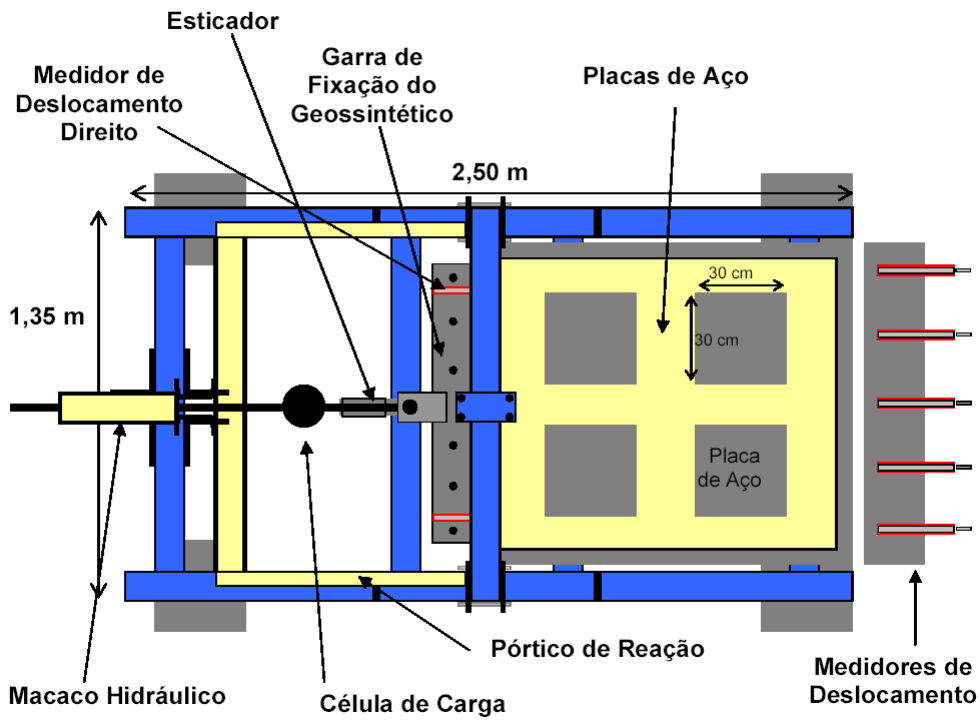


Figura 138 - Vista superior da configuração de arrancamento.

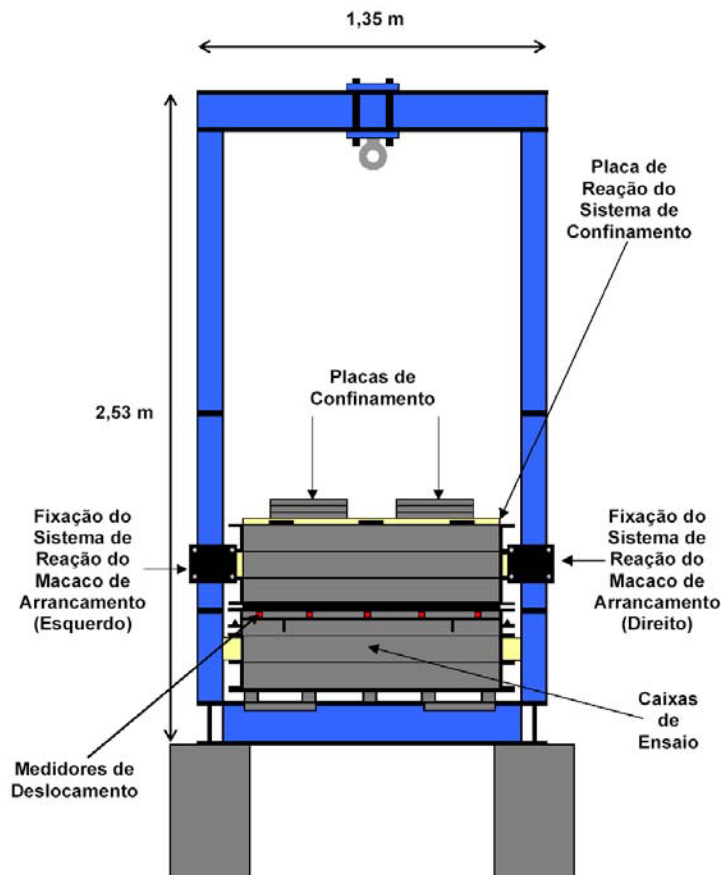


Figura 139 - Vista frontal da configuração de arrancamento.

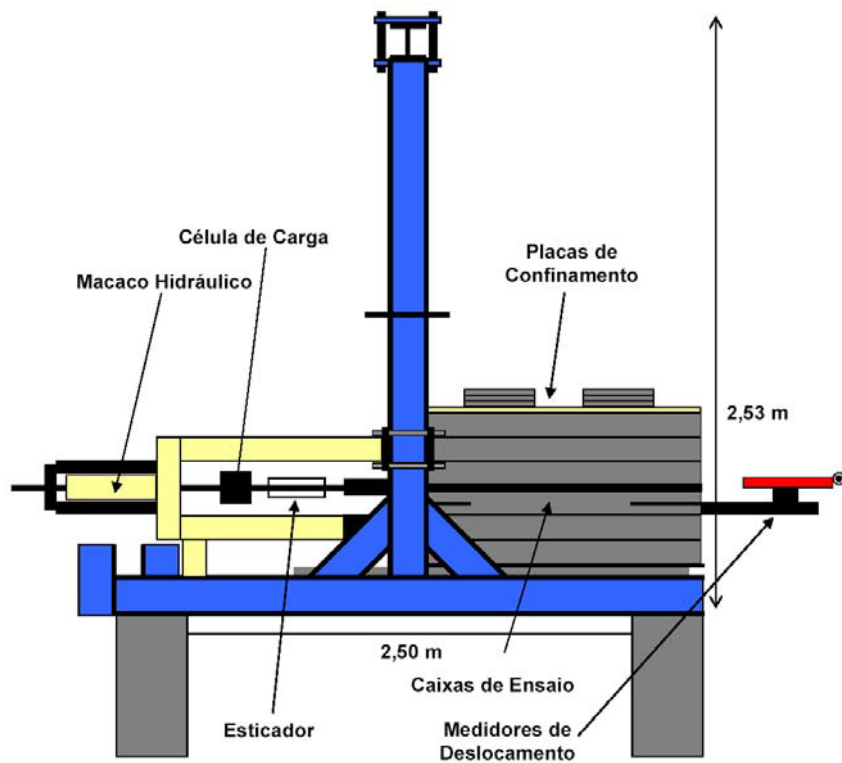


Figura 140 - Vista lateral da configuração de arrancamento.

De forma análoga ao ensaio de cisalhamento direto CC120R-30, a configuração de ensaio de arrancamento AR120R-30 foi planejada para ter variações no seu arranjo interno. As possibilidades de arranjo são apresentadas na Figura 141.

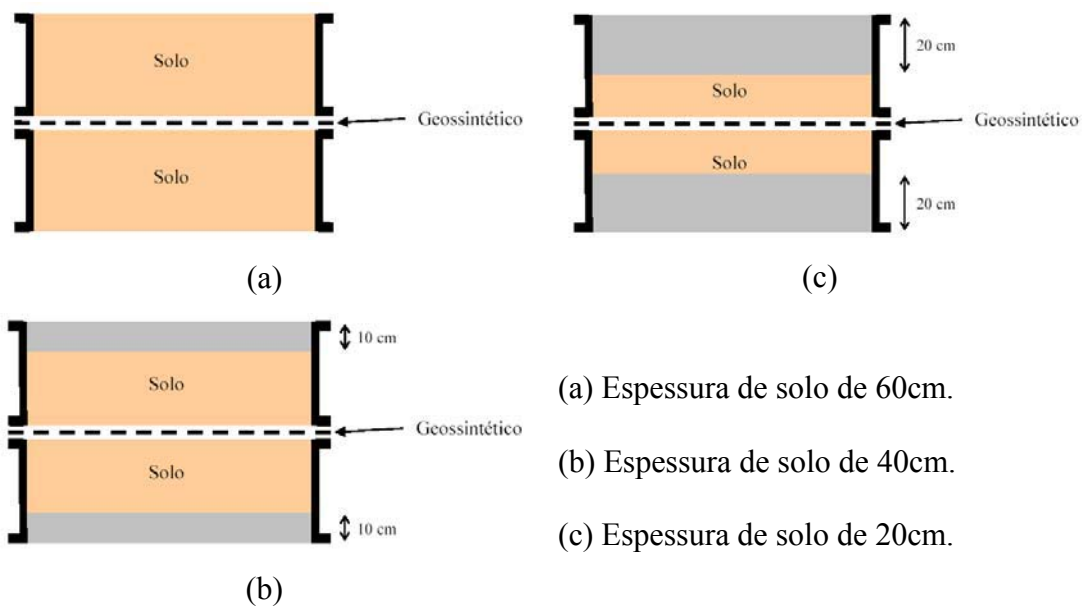


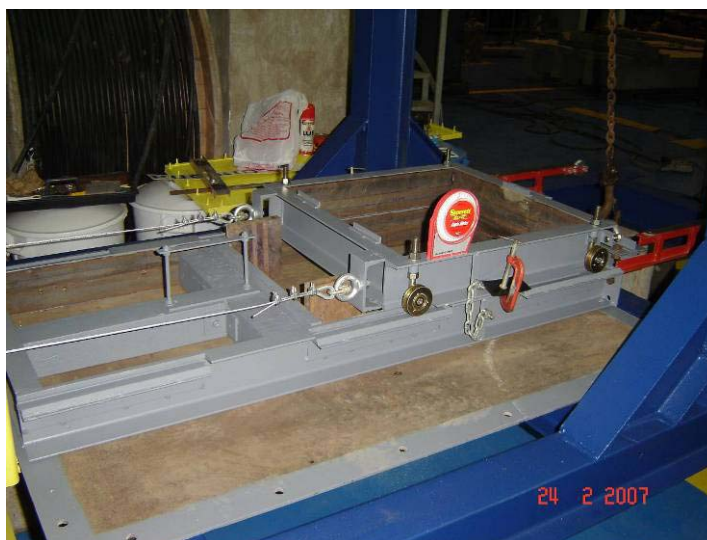
Figura 141 - Configuração das caixas de ensaio de arrancamento AR120R-30

4.5. Testes Preliminares

Uma série de testes preliminares foi realizada para verificar o desempenho do equipamento. Eles consistiram em avaliar o possível atrito entre o trilho da caixa de ensaio inferior e roldanas da caixa de ensaio superior e a resistência à tração dos cabos de aço do sistema de aplicação de força cisalhante.

Para a avaliação do atrito foram executados testes simples em cada um dos conjuntos de caixas de ensaio, excetuando-se o conjunto 6. O teste consistiu em montar os conjuntos de ensaio como se fosse realizar um ensaio de rampa, ou seja, colocar uma caixa sobre a outra, espaçar as caixas e bascular a rampa até o deslizamento da caixa superior em relação à inferior. Em todos os conjuntos testados, o movimento de uma caixa em relação à outra ocorreu para inclinações inferiores a $0,5^\circ$. Desta forma, pode-se afirmar que o atrito do sistema é desprezível. Porém, recomenda-se manter os conjuntos de roldanas lubrificados, mantendo-se as mesmas condições dos testes de verificação.

O segundo tipo de teste preliminar serviu para verificar o desempenho do sistema de aplicação de força cisalhante. O principal objetivo deste teste foi determinar a perda de carga de tração devido à deformação dos cabos de aço. Para isso foi realizado um procedimento que consistia em travar a caixa de ensaio superior (Figura 142), ajustar o sistema de medição e aplicar o carregamento (Figura 143).



(a) Ensaio na posição 0° .

Figura 142 - Avaliação do sistema de aplicação de força cisalhante.



(b) Ensaio na posição 45°.

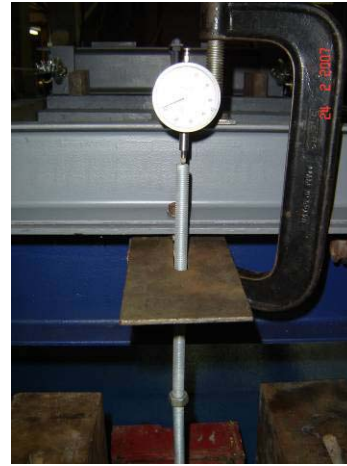


(c) Detalhe do travamento da caixa superior.

Figura 142 (cont.) - Avaliação do sistema de aplicação de força cisalhante.



(a) Conjunto no início do teste.



(b) Detalhe do Extensômetro.



(c) Teste em andamento.

Figura 143 - Ensaio do sistema de aplicação de força cisalhante.

Este procedimento foi realizado para a rampa nas posições 0, 15, 30 e 45 graus e para os conjuntos de caixa de ensaio 2 e 4. Os resultados obtidos são apresentados por meio de curvas deslocamento x peso aplicado (Figura 144).

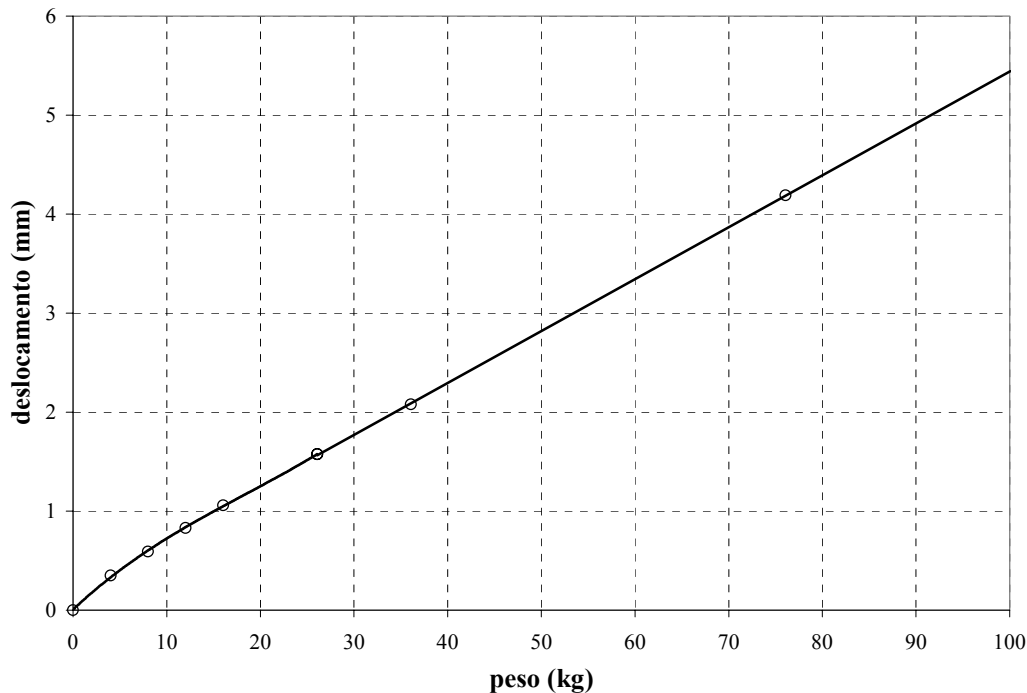


Figura 144 - Resultados típicos dos testes de avaliação de desempenho do sistema de aplicação de força cisalhante.

Independente da inclinação da rampa, os resultados forneceram curvas semelhantes. Observou-se que os valores de deslocamento medidos foram considerados elevados para as cargas aplicadas. Verificações posteriores revelaram que a junção da roldana com a coluna de fixação à plataforma (Figura 143) apresentava rigidez reduzida. Desta forma, procedeu-se à troca da mesma por outra de maior rigidez. Como limite de aplicação de carga na plataforma estabeleceu-se 150kg.

4.6. Limitações de Uso

Conforme exposto anteriormente o sistema de confinamento por pesos tem uma restrição de operação. Para os ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado, a medida que a plataforma de ensaio báscula, o centro de gravidade do conjunto de confinamento se desloca em relação ao seu centro geométrico. No limite, ocorre à perda de confinamento na extremidade traseira da caixa superior, devido à tendência de tombamento das placas de aço.

Desta forma, análises foram realizadas para determinação do limite de inclinação da rampa sem a ocorrência de tombamento. Sabe-se que a tensão de confinamento sobre uma determinada área pode ser expressa por:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{\frac{b \times h^2}{6}} \quad (11)$$

$$M = P \times x \quad (12)$$

$$A = b \times h \quad (13)$$

onde:

σ = tensão de confinamento;

P = peso aplicado;

A = área;

M = momento;

x = braço de alavanca;

b e h = arestas da base.

A situação limite ocorre para uma tensão nula em uma das extremidades do conjunto formado pela caixa superior e placas de aço. Desta forma, igualando-se a Equação 11 a zero, obtêm-se o parâmetro x igual a 1/6 da aresta. Portanto, para eliminar o tombamento, a projeção do centro de gravidade deve se situar no terço médio do conjunto formado pela caixa de ensaios mais placas.

A Figura 145 ilustra esquematicamente as condições ideal e de tombamento com a inclinação da rampa. Se a projeção do centro de gravidade (X_{CG}) do conjunto formado pela caixa de ensaio mais placas de aço não coincidir com a projeção do terço médio do conjunto, afastado de uma distância (X_2) da extremidade da rampa, ocorre o travamento da caixa superior devido à tendência ao tombamento da extremidade do conjunto.

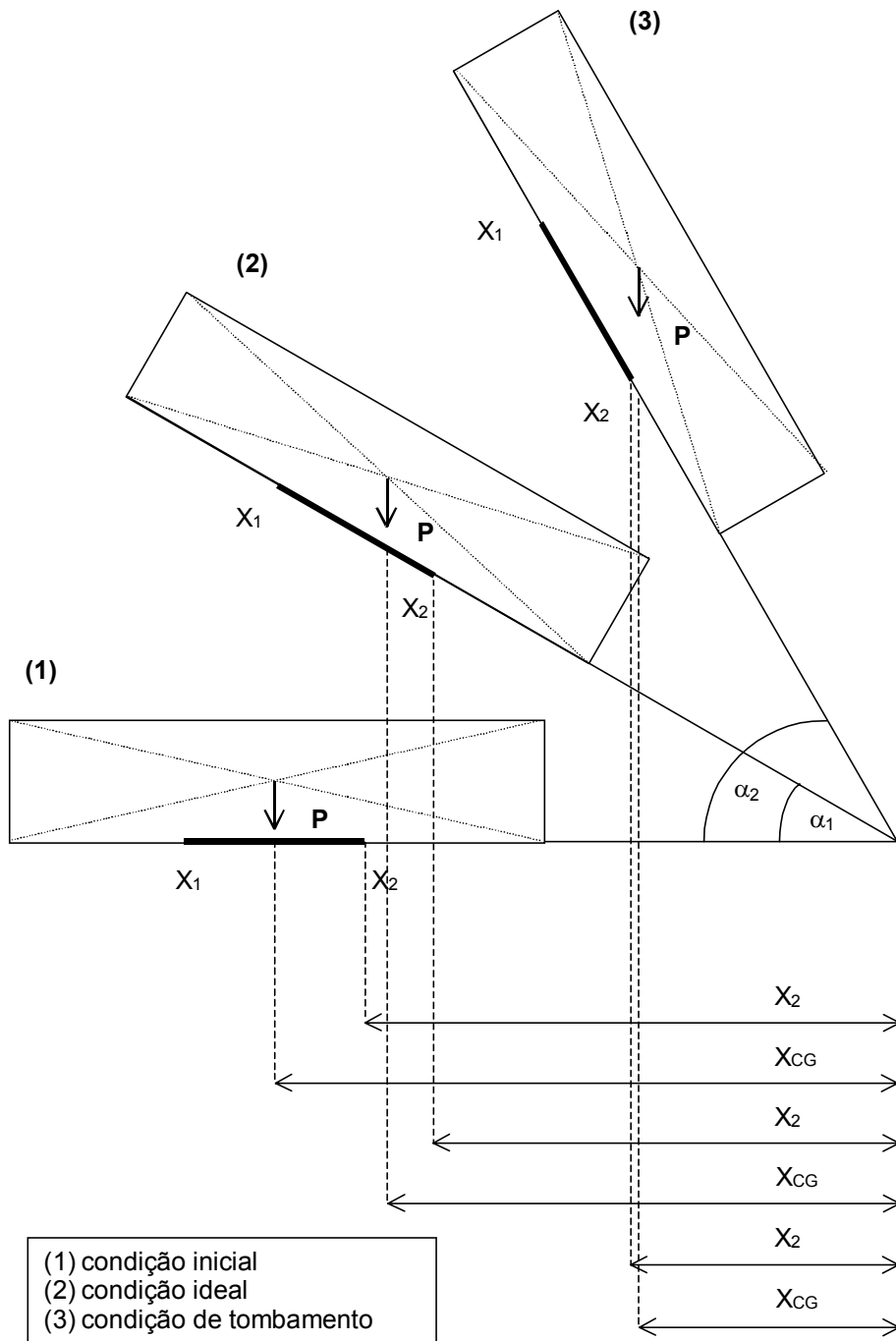


Figura 145 - Condição de tombamento do sistema de confinamento com a inclinação da plataforma de ensaios (Aguiar, 2003).

Considerando a Figura 145 e as Equações 11 a 13, foi realizada uma análise de estabilidade do sistema de confinamento ao tombamento variando-se os parâmetros X_2 e X_{CG} em função do ângulo de inclinação, para cada um dos conjuntos de caixas de ensaio. A Figura 146 apresenta os resultados desta análise para o conjunto 1 de caixas de ensaio. O limite para a não ocorrência do tombamento corresponde ao valor do ângulo onde as curvas se interceptam.

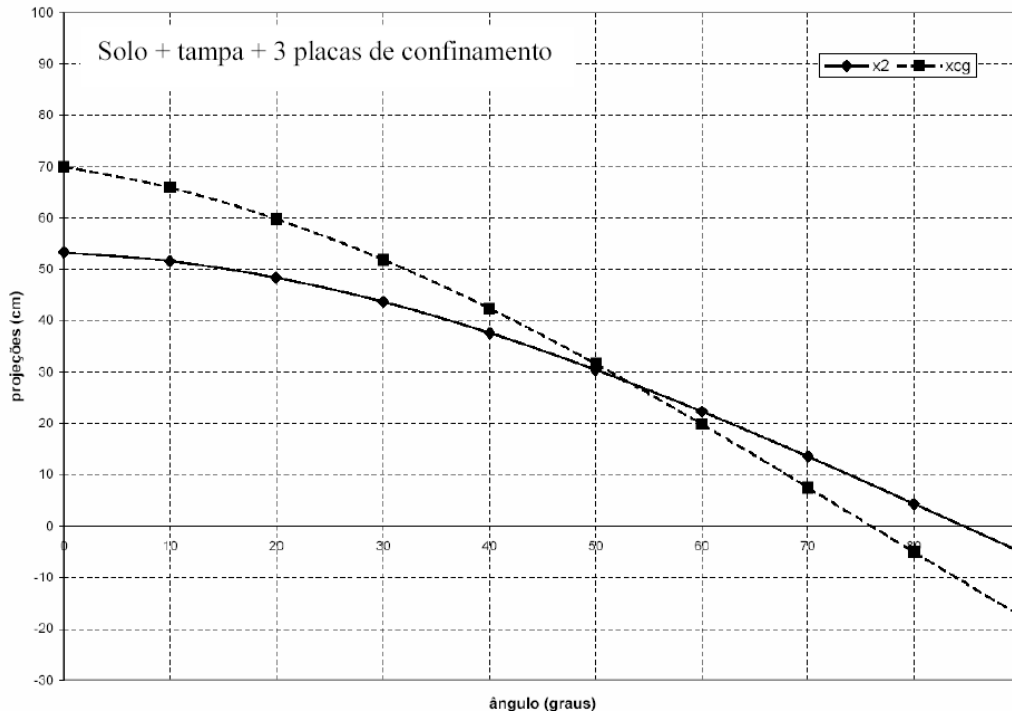


Figura 146 - Exemplo de análise de tombamento das caixas de ensaio do conjunto 1.

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise de tombamento para as condições possíveis de confinamento do conjunto 1 de caixas de ensaio. O valor do ângulo crítico ($\alpha_{\text{crít}}$) representa a inclinação crítica da rampa onde há tombamento.

Tabela 22 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 1 de caixas de ensaio.

Condição	solo/tampa	solo/tampa	solo/tampa	solo/tampa
	0 placa	1 placa	2 placa	1 placa
$\alpha_{\text{crít}}$	62,4	59,1	56,0	53,2

Para os demais conjuntos de caixas, de 2 a 5, foi feita a mesma análise. Porém, diferentemente do conjunto de caixas 1 onde a espessura de solo é fixa, os novos conjuntos de caixas destinados aos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado permitem a variação da espessura de solo. Assim, para facilitar a consulta aos valores limites, gerou-se ábacos de ângulo crítico para o tombamento. Esses ábacos consideram a espessura de solo e a quantidade de placas usadas no sistema de confinamento. As Figuras 147 a 150 apresentam os referidos ábacos.

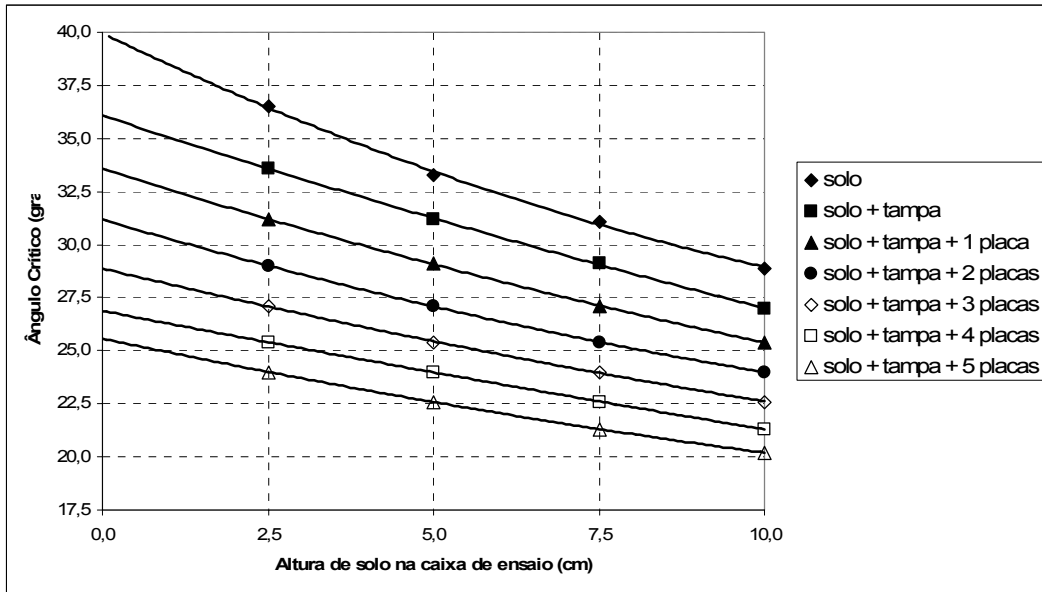


Figura 147 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 2 de caixas de ensaio.

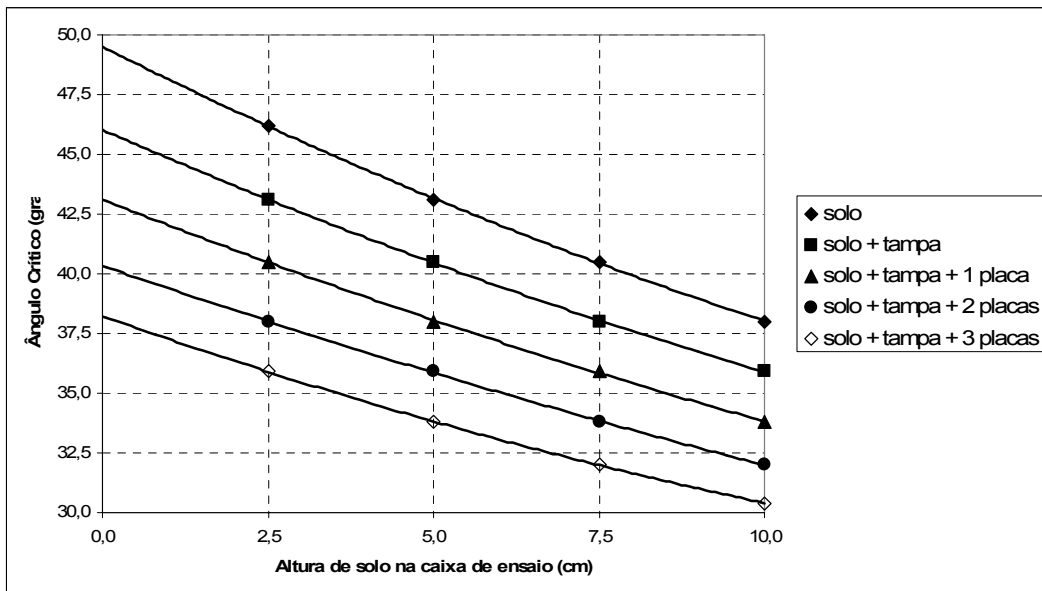


Figura 148 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 3 de caixas de ensaio.

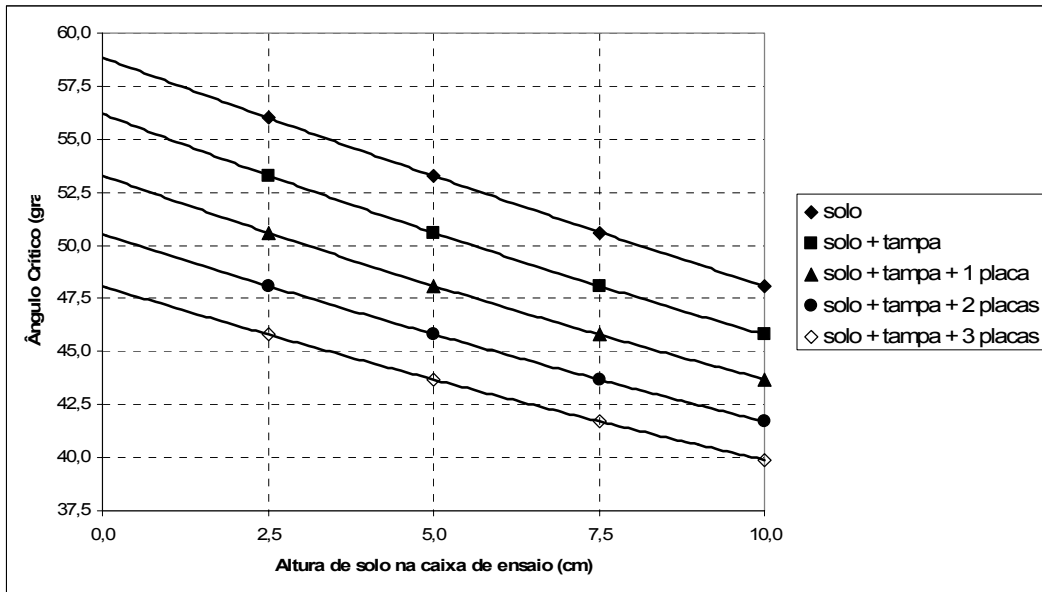


Figura 149 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 4 de caixas de ensaio.

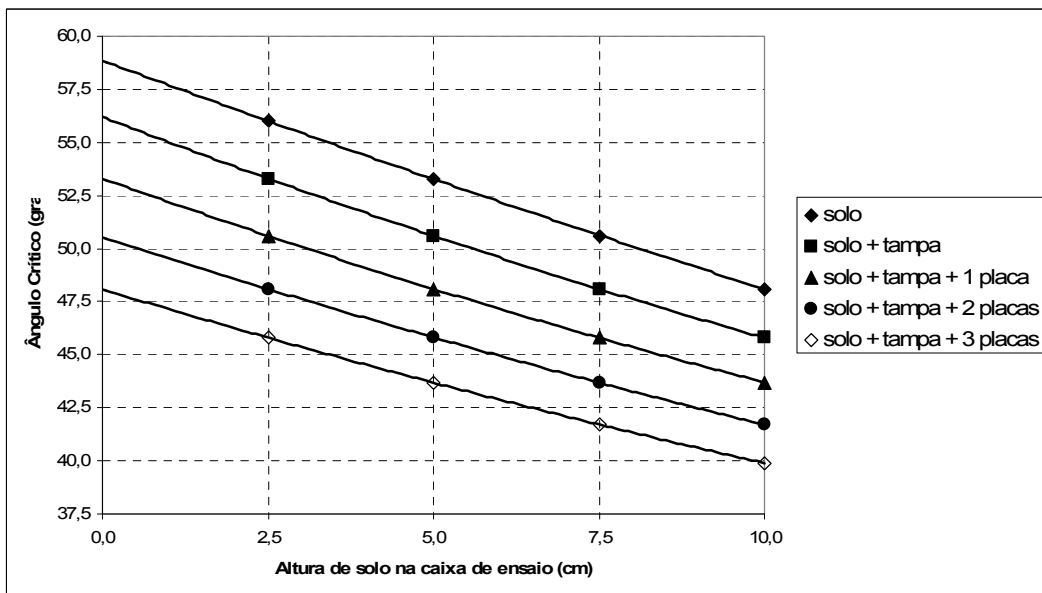


Figura 150 - Ângulos críticos ao tombamento para o conjunto 5 de caixas de ensaio.

Todos os resultados desses estudos de estabilidade ao tombamento estão apresentados no Apêndice V.

4.7. Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar o equipamento desenvolvido. Das configurações projetadas, foram construídas as de ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado. As de cisalhamento direto convencional e arrancamento tiveram alguns de seus componentes concluídos. Entretanto, a habilitação completa do equipamento para a execução destes ensaios será realizada por futuras pesquisas.

Foram propostas ou construídas 5 configurações de ensaio de rampa, 3 configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado, 4 de cisalhamento direto convencional e uma de arrancamento. Elas são resultantes da combinação da estrutura principal com os diferentes acessórios. É importante frisar, que sempre que possível, um acessório foi utilizado mais de uma vez.

Como todo novo equipamento, foi necessário realizar alguns testes preliminares para averiguar o seu correto funcionamento. Eles determinaram o atrito entre as roldanas da caixa superior e o trilho da caixa inferior e o limite de utilização do sistema de aplicação de força cisalhante. Em relação ao atrito concluiu-se que ele pode ser desprezado desde que se mantenham os conjuntos de roldanas lubrificadas. Em relação ao sistema de aplicação de força cisalhante, os testes realizados indicaram a necessidade de substituição por outro mais resistentes. O limite de utilização do novo sistema foi estabelecido como 150kg.

O equipamento tem um limite de operação no que concerne ao sistema de confinamento dos ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado. Esta restrição é associada à tendência de tombamento das placas de confinamento. Para cada conjunto de caixas de ensaio foram estabelecidos ângulos críticos de funcionamento apresentados sob a forma de ábacos.

5. Programa Experimental

5.1. Considerações Iniciais

A tese tem como objetivos a calibração e verificação do desempenho do equipamento desenvolvido, obtenção dos parâmetros de interfaces dos materiais ensaiados e complementação do banco de dados existente para comparações.

Para isso, foi organizado um programa experimental que compreende: materiais utilizados, preparação dos corpos de prova, procedimento de ensaio, programa de ensaios e metodologias de análise de resultados.

A seleção dos materiais da pesquisa privilegiou a utilização de solos e geossintéticos empregados em pesquisas anteriores. O solo, areia de Ipanema, é de fácil utilização no que concerne à estocagem, preparação e compactação. Os geossintéticos empregados foram a geomembrana CipaGeo (Cipatex), a geomembrana Polimanta (Engepol) e a geogrelha u8Fortrac 35/25-20/30 (Huesker).

A preparação dos corpos de prova foi igual para todos os ensaios e seguiu as recomendações técnicas correntes no que se refere à amostragem dos geossintéticos e compactação do solo. Cada um dos ensaios, rampa ou cisalhamento, tem metodologias de ensaio e de análise de resultados adaptadas as particularidades de cada um.

O programa de ensaios contemplou a realização de ensaios que são utilizados na verificação e calibração do equipamento e ensaios para obtenção dos parâmetros de interface dos materiais utilizados na pesquisa.

Além disso, utilizou-se o banco de dados acumulado até o momento para comparação e complementação do trabalho.

5.2. Materiais da Pesquisa

No programa experimental foram utilizados um solo (areia) e três tipos de materiais geossintéticos (uma geogrelha e duas geomembranas).

5.2.1. Solo

A areia é proveniente da praia de Ipanema (Figura 151). É uma areia uniforme de quartzo, com partículas de dimensões que variam entre 0,074 e 2,38mm (Figura 152). Os valores de peso específico mínimo e máximo são de 15,47 e 17,04kN/m³, respectivamente.

As densidades relativas utilizadas nos ensaios foram de 15, 45 e 90%. Nas Tabelas 23 e 24 encontram-se algumas das características do material, tais como os diâmetros máximo ($D_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($D_{m\acute{i}n}$), os diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c) e os pesos específicos máximo ($\gamma_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($\gamma_{m\acute{i}n}$).



Figura 151 - Areia de Ipanema.

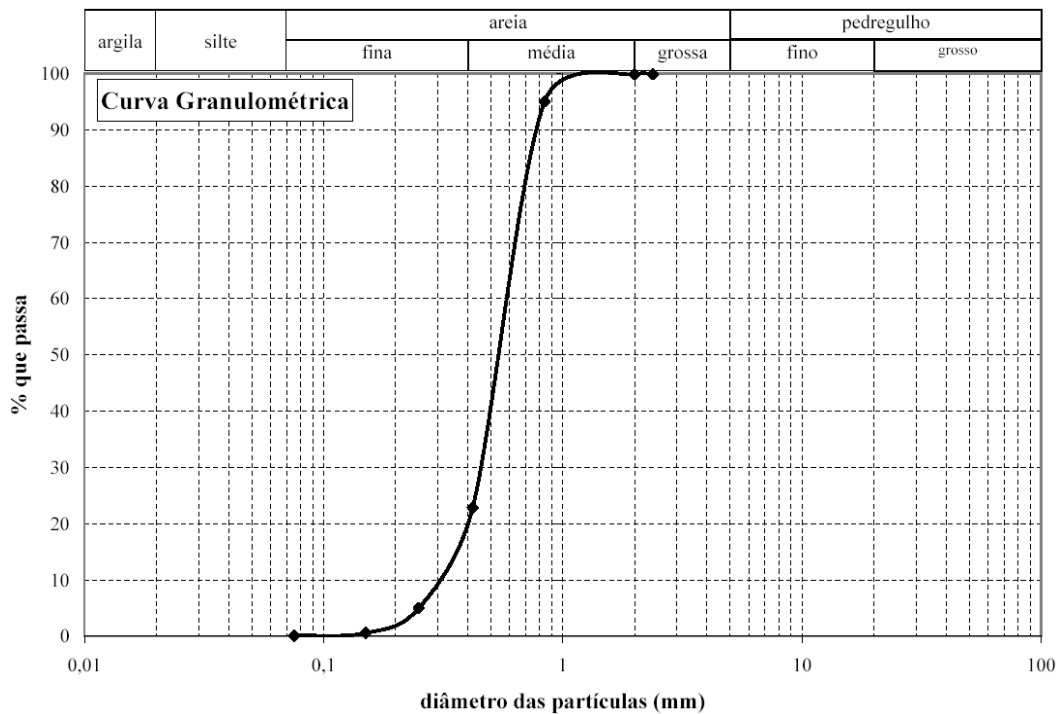


Figura 152 - Curva granulométrica da areia de Ipanema.

Tabela 23 - Características granulométricas da areia de Ipanema

Solo	D_{\min} (mm)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	D_{\max} (mm)	C_u	C_c
areia	0,08	0,31	0,45	0,60	2,38	1,94	1,09

Tabela 24 - Características físicas da areia de Ipanema

Areia	γ_s (kN/m ³)	γ_{\max} (kN/m ³)	γ_{Dr} (kN/m ³)	γ_{\min} (kN/m ³)	e_{\min}	e_{Dr}	e_{\max}
Dr 15%	26,09	17,04	15,69	15,47	0,53	0,66	0,69
Dr 45%	26,09	17,04	16,14	15,47	0,53	0,62	0,69
Dr 90%	26,09	17,04	16,87	15,47	0,53	0,55	0,69

5.2.2. Geossintéticos

A primeira geomembrana utilizada foi a CipaGeo, de PVC, texturizada em uma das faces, fabricada pela Cipatex (Figura 153). A Tabela 25 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

Tabela 25 - Características da Geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Densidade	1200kg/m ³	ASTM D 792A
Gramatura	960g/m ²	NBR 12592
Espessura	0,8mm	ASTM D 1593
Resistência à Tração	10N/mm	ASTM D 882
Resistência ao Rasgo	35N	ASTM D 1004
Alongamento na Ruptura	200%	ASTM D 882
Módulo de Elasticidade	8MPa	ASTM D 882

A segunda geomembrana foi a Polimanta, de PEAD, fabricada pela Engepol (Figura 153), possuindo as duas faces lisas. A Tabela 26 apresenta as principais características do material fornecidas pelo o fabricante.

Tabela 26 - Características da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio	
Espessura Nominal	1mm	ASTM D 5199	
Densidade	≥ 0,94g/m ³	ASTM D 792	
Resistência à Tração	no Escoamento na Ruptura	≥ 15kN/m ≥ 27kN/m	ASTM D 6693
Alongamento no Escoamento	≥ 12%		
Alongamento na Ruptura	≥ 700%		
Resistência ao Rasgo	≥ 125N	ASTM D 1004	
Resistência ao Puncionamento	≥ 320N	ASTM D 4833	

A geogrelha empregada foi a Fortrac 35/25-20/30 fabricada pela Huesker (Figura 153c). Ela é constituída de poliálcool de vinila (PVA) e suas características, segundo o fabricante, são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Características da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2003)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Massa por Unidade de Área	270g/m ²	ASTM D-5261
Abertura	20 x 30mm	~
Porcentagem de Área Aberta	70 %	~
Resistência à Tração	Longitudinal	35kN/m
	Transversal	25kN/m
Alongamento na Ruptura (longitudinal)	4-6%	ASTM D-6637

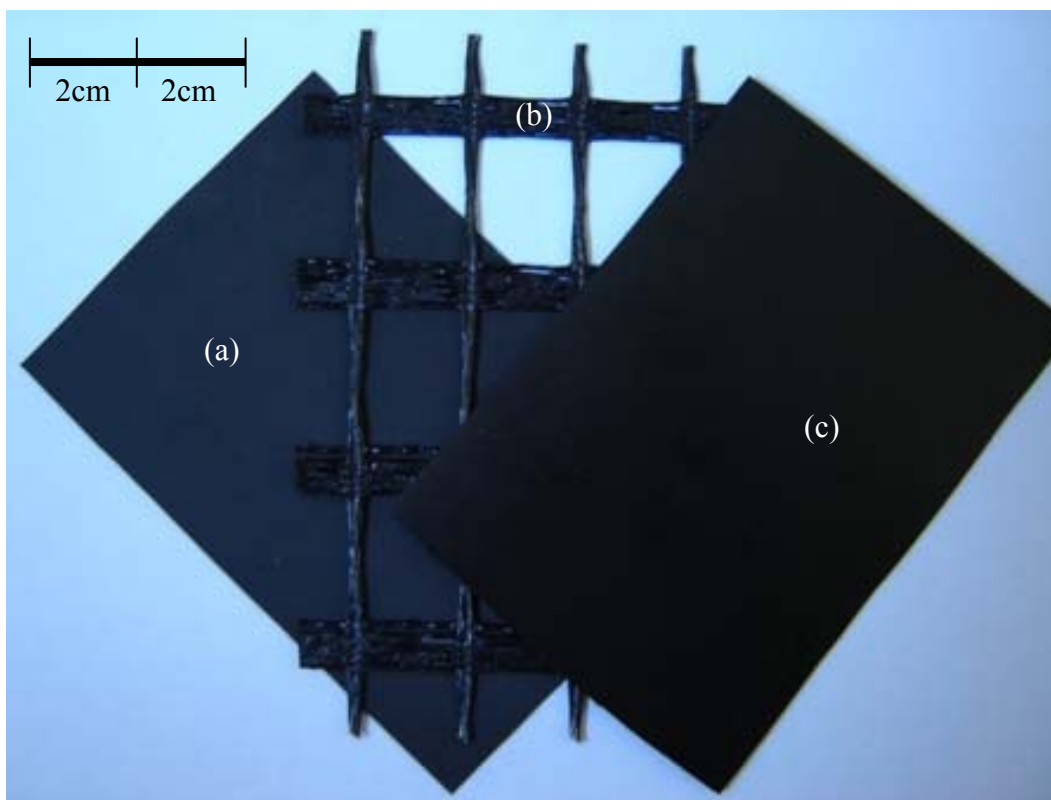


Figura 153 - Geossintéticos utilizados na pesquisa: (a) geomembrana Cipageo, (b) geogrelha Fortrac e (c) geomembrana Polimanta.

5.3. Preparação dos Corpos de Prova

A amostragem dos materiais geossintéticos seguiu as recomendações da norma DIN EN 963. Ela recomenda que, do rolo de origem das amostras, sejam desprezadas as duas primeiras voltas, assim como os 10cm das extremidades (Figura 154). A estocagem deve ser em local adequado, sem exposição à luz, umidade e poeira.

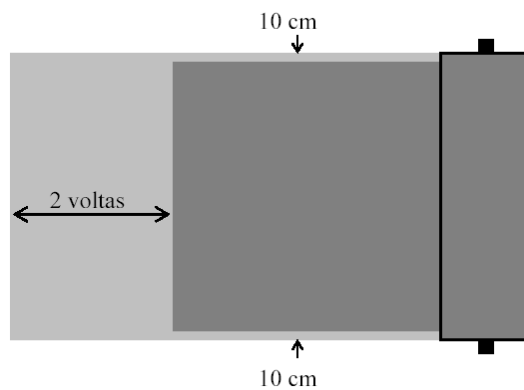


Figura 154 - Recomendação de descarte da Norma DIN EN 963.

Para a pesquisa, foram confeccionadas amostras com dimensões compatíveis a cada uma das configurações de ensaio, ou seja, largura igual a da caixa inferior e comprimento igual ao da caixa inferior mais 20cm para a ancoragem na garra (Figura 155).



Figura 155 - Amostra de geogrelha na caixa média quadrada (dimensões 0,70 x 0,90m).

A areia de Ipanema foi empregada nas densidades relativas de 15, 45 e 90%. Para obter a densidade 15% não houve necessidade de compactação, pois o material alcançava o índice de vazios desejado somente com o seu lançamento na caixa com o auxílio de uma concha metálica. Para se obter as densidades relativas de 45 e 90% empregou-se um peso metálico e um motovibrador, respectivamente. (Figura 156a e b).



(a) peso de compactação



(b) motovibrador

Figura 156 - Compactadores utilizados para as densidades relativas de 45 e 90%.

Independente do tipo de ensaio, rampa ou cisalhamento, o método de preparação dos corpos de prova foi sempre o mesmo. A seqüência inicia-se com a limpeza da caixa inferior removendo-se qualquer sobra de solo dos ensaios anteriores. Segue com disposição do solo na caixa com o volume necessário para a obtenção do peso específico desejado e nivelamento da superfície (Figura 157).



(a) Caixa inferior limpa e pronta para receber o solo.



(b) Lançamento do solo.



(c) Caixa inferior recebendo solo.

Figura 157 - Seqüência construtiva de preparação de um corpo de prova - caixa inferior.



(d) Colocação da gola.

(e) Superfície pronta.

Figura 157 (cont.) - Seqüência construtiva de preparação de um corpo de prova - caixa inferior.

Logo após, instala-se o geossintético sobre a superfície nivelada, esticando-o e ancorando uma das extremidades na garra metálica (Figura 158). Este procedimento só se aplica a interfaces solo-geossintético.



Figura 158 - Geogrelha na posição de ensaio.

Em seguida, instala-se a caixa superior de ensaio, prendendo-se os limitadores de deslocamento e a instrumentação (*tell-tale*). Lança-se o solo e regulariza-se a superfície da mesma forma que foi feito para a caixa inferior (Figuras 159).



(a) Colocação da caixa superior.



(b) Colocação do limitador.



(c) Instalação da instrumentação.



(d) Lançamento do solo.



(e) Nivelamento da superfície.



(f) Colocação da tampa de confinamento.

Figura 159 - Seqüência construtiva de preparação de um corpo de prova - caixa superior.

A seqüência de preparação dos corpos de prova segue com a colocação do das placas de confinamento (Figura 160) e do espaçamento das caixas de ensaio (Figura 161).



Figura 160 - Colocação das placas de confinamento.



Figura 161 - Procedimento para espaçar a caixa de ensaio.

Porém, para a realização dos ensaios ainda são necessários a instalação de mais alguns acessórios. No caso dos ensaios de rampa é necessário instalar o medidor de ângulo de base magnética (Figura 162).



Figura 162 - Posição do medidor de ângulo de base magnética.

Para os ensaios de cisalhamento, seja o convencional ou inclinado, é necessário instalar a plataforma de aplicação de força cisalhante. O procedimento

consiste em bloquear o movimento da caixa superior com o auxílio de grampos tipo C, instalar os anéis de carga e os suportes das roldanas, fixar os cabos de aço e instalar e nivelar a plataforma de carga. As Figuras 163 a 166 exemplificam o procedimento.



Figura 163 - Bloqueio da caixa superior com grampos tipo C..

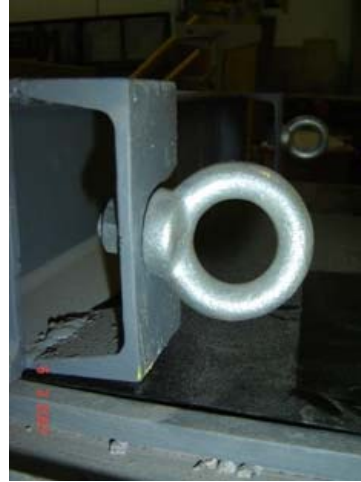


Figura 164 - Instalação dos anéis de carga.



Figura 165 - Instalação dos cabos de aço nos anéis de carga da caixa superior.



Figura 166 - Instalação dos suportes das roldanas e da plataforma.



Figura 167 - Nivelamento da plataforma.

5.4. Procedimento de Ensaio

5.4.1. Ensaio de Rampa

O procedimento do ensaio de rampa é muito simples. Consiste em acionar a talha de forma a inclinar gradualmente, aplicando-se na plataforma de ensaios incrementos de 1º/minuto, mensurados com o auxílio do medidor de ângulo de base magnética, até que a caixa superior deslize (Figura 168). Para cada incremento de ângulo monitoram-se os deslocamentos da caixa superior em relação à inferior até ocorrer à ruptura da interface.



Figura 168 - Ensaio de rampa finalizado - vista lateral.

Os resultados são apresentados na forma de gráficos de ângulo de inclinação de rampa α versus deslocamento da caixa δ , conforme ilustrado na Figura 169. O valor adotado para o deslocamento da caixa superior a cada estágio corresponde à média dos deslocamentos medidos nas duas extremidades da caixa, por meio dos *tell-tales*.

Como a caixa superior consegue atingir o deslocamento máximo de 200mm, para melhor apresentação dos resultados, os gráficos serão apresentados com valores de deslocamentos máximos de 50mm.

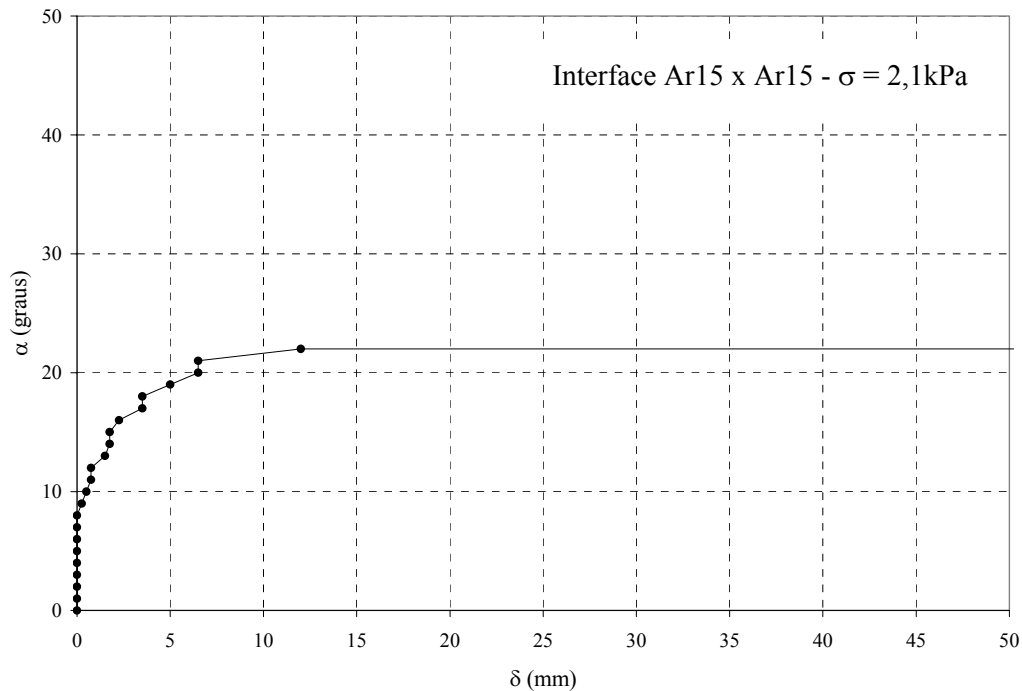


Figura 169 - Resultado típico de um ensaio de rampa.

5.4.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

O procedimento do ensaio de cisalhamento direto é igual ao ensaio de cisalhamento direto convencional de pequenas dimensões. Consiste em aplicar uma força normal sobre um corpo de prova contido por uma caixa bipartida empregando-se placas de aço (Figura 170). A força tangencial é aplicada na caixa superior, deslocando-a, até que ocorra a ruptura ao longo do plano horizontal (Figura 171). A aplicação desta força é feita através de pesos calibrados progressivamente depositados na plataforma de carga. São monitorados a força cisalhante e o deslocamento da caixa superior durante o ensaio.



Figura 170 - Aplicação de tensão normal em um ensaio de interface solo-geogrelha ($\sigma_c=8,4\text{kPa}$).



Figura 171 - Aplicação de tensão cisalhante.

Os resultados são apresentados na forma de gráficos força cisalhante, em (kN) vs deslocamento da caixa δ (mm) conforme indicado na Figura 172.

Adotado-se para o deslocamento da caixa superior à média dos deslocamentos medidos nas duas extremidades da caixa. Os gráficos serão apresentados com valores de deslocamentos máximos de 50mm, seguindo a metodologia do ensaio de rampa.

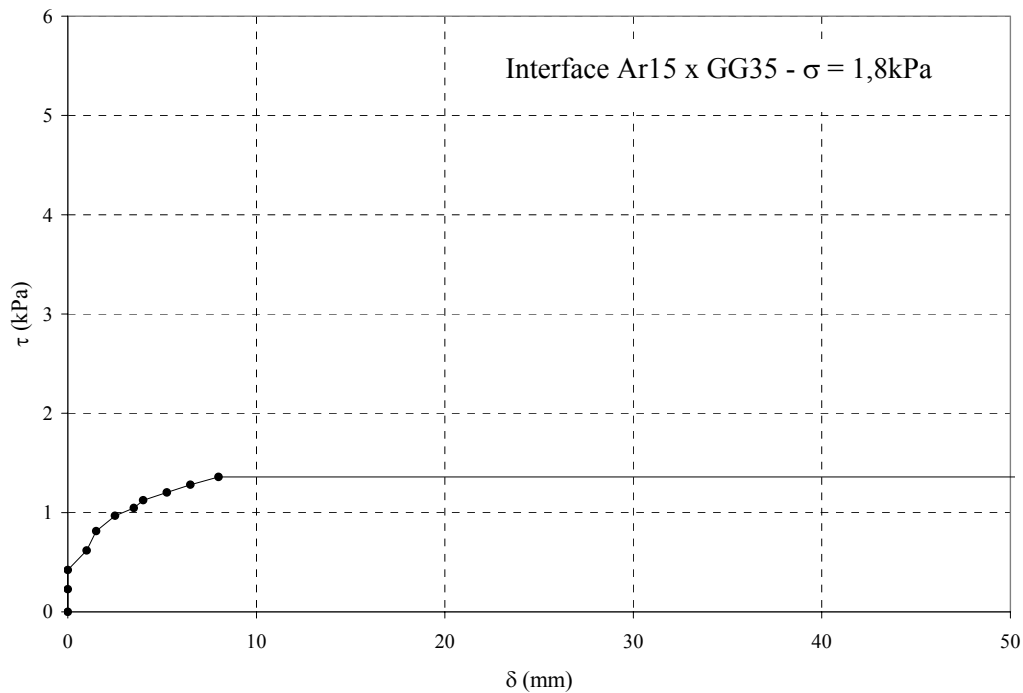


Figura 172 - Resultado típico de um ensaio de cisalhamento direto.

5.4.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

O procedimento do ensaio de cisalhamento direto inclinado também é relativamente simples. Consiste em inclinar a plataforma de ensaios até um ângulo pré-determinado, monitorado com o auxílio do medidor de ângulo de base magnética (Figura 173). Durante esta fase do ensaio, a caixa superior ainda é presa pelos grampos tipo C. O ensaio de cisalhamento direto inclinado se inicia com a remoção dos grampos e a colocação de pesos sobre a plataforma de aplicação de cargas da mesma forma que no ensaio de cisalhamento direto convencional. Para cada estágio (incremento de carga), monitoram-se os deslocamentos da caixa superior em relação à inferior até ocorrer à ruptura da interface.



Figura 173 - Inclinação da plataforma para ensaio de cisalhamento direto inclinado. Observa-se o grampo tipo C impedindo o movimento da caixa superior.

Os resultados são apresentados na forma de gráficos força cisalhante, em (kN) vs deslocamento da caixa δ (mm), conforme a Figura 174. O valor adotado para o deslocamento da caixa superior a cada estágio corresponde à média dos deslocamentos medidos nas duas extremidades da caixa. Os gráficos serão apresentados com valores de deslocamentos máximos de 50mm, seguindo a metodologia do ensaio de rampa.

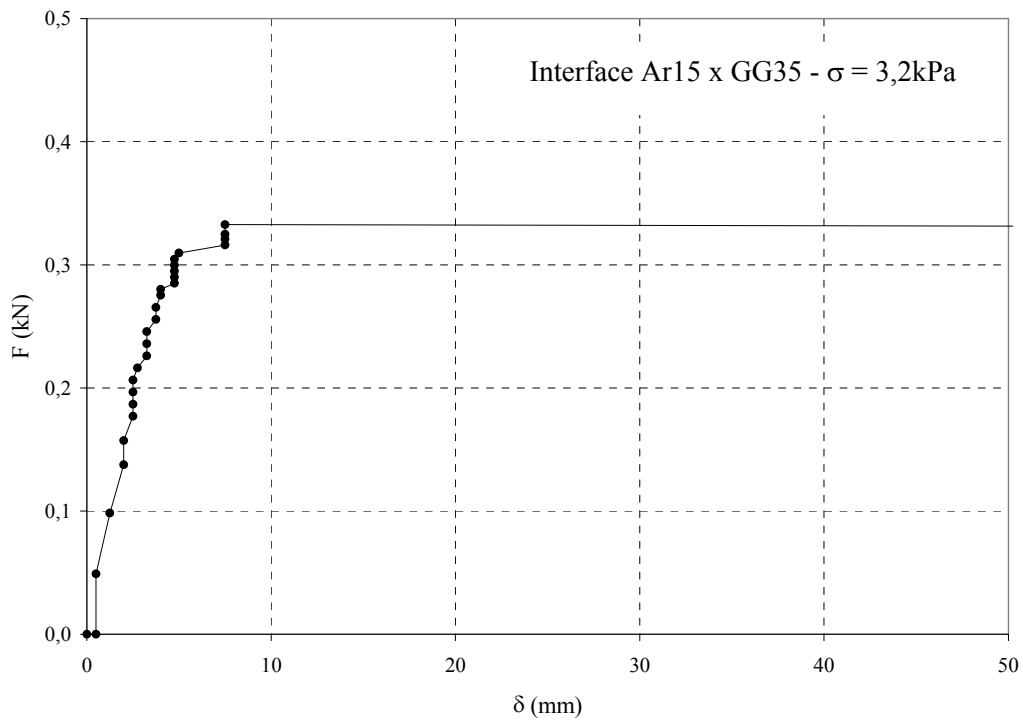


Figura 174 - Resultado típico de um ensaio de cisalhamento direto inclinado.

5.5. Metodologias de Análises de Resultados

Para se obter os parâmetros de interface (a e ϕ_{sg}), deve-se construir a envoltória de resistência a partir de uma série de ensaios com diferentes tensões de confinamento, conforme Equação (1) do Item 2.4.

As tensões atuantes em cada um dos ensaios de rampa, cisalhamento direto inclinado e convencional são as tensões normal (σ) e cisalhante (τ) no plano da interface solo-solo ou solo-geossintético.

Observa-se que as curvas típicas em termos de ângulo de rampa (ou força cisalhante) vs deslocamento podem ser transformadas em curvas tensão cisalhante vs deslocamento, possibilitando as comparações entre os diferentes tipos ensaios.

5.5.1. Ensaio de Rampa

No ensaio de rampa as tensões cisalhante e normal são oriundas do peso do conjunto solo-caixa superior. A Figura 175 esquematiza o conjunto de forças atuantes no ensaio de rampa, onde P é a força vertical confinante (soma do peso da camada de solo mais a tampa de confinamento e placas de aço), $P \cdot \cos\alpha$ a componente normal, $P \cdot \sin\alpha$ a componente cisalhante. A força Q é o peso da caixa de ensaio, $Q \cdot \cos\alpha$ a componente normal, $Q \cdot \sin\alpha$ a componente tangencial do peso da caixa superior. Entretanto, é importante mencionar que a componente do peso da caixa superior na direção normal ao plano é resistida pela caixa inferior de ensaio, não contribuindo na tensão normal. Denominou-se de F a componente tangencial $Q \cdot \sin\alpha$.

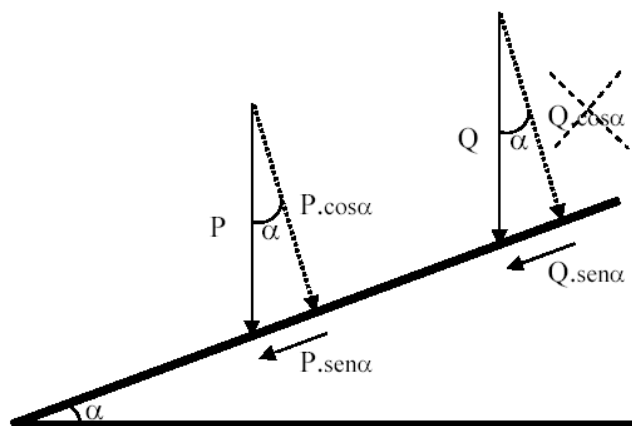


Figura 175 - Esquema de forças do ensaio de rampa.

Sabe-se que a tensão normal não é uniforme ao longo da superfície de contato solo-geossintético. Ela varia com a inclinação da rampa e apresenta uma distribuição trapezoidal. Porém, assume-se, para efeito de cálculo, que ela é uniformemente distribuída. Desta forma, tem-se:

$$\sigma = \frac{P \times \cos\alpha}{A} \quad (14)$$

$$\tau = \frac{P \times \sin\alpha + F}{A} \quad (15)$$

$$F = Q \times \sin\alpha \quad (16)$$

onde:

σ = tensão normal na interface;

τ = tensão cisalhante na interface solo-geossintético;

P = força vertical confinante;

A = área de contato solo-geossintético;

α = ângulo de inclinação da rampa;

F = componente tangencial do peso da caixa superior;

Q = peso da caixa superior.

5.5.2. Cisalhamento Direto Convencional e Inclinado

No ensaio de cisalhamento inclinado a tensão normal é oriunda do peso do conjunto solo, tampa de confinamento e placas de aço. Porém, a tensão cisalhante é devida à soma de duas parcelas: componente do peso do conjunto anteriormente citado e peso depositado na plataforma de aplicação de cargas. A Figura 176 esquematiza o conjunto de forças atuantes no ensaio de cisalhamento inclinado, onde além das forças atuantes no ensaio de rampa temos a força C, que é a componente devido aos pesos depositados na plataforma de cargas.

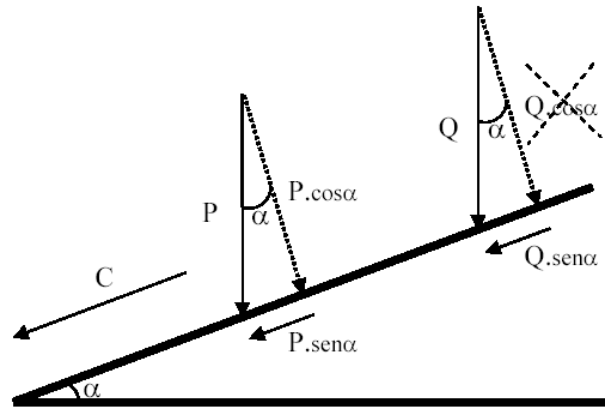


Figura 176 - Esquema de forças do ensaio de cisalhamento direto inclinado.

Desta forma, a tensão cisalhante pode ser expressa por:

$$\tau = \frac{P \times \text{sen}\alpha + F + C}{A} \quad (17)$$

onde:

C = peso depositado na plataforma de cargas.

O ensaio de cisalhamento direto pode ser visto como um caso particular do ensaio de cisalhamento direto inclinado, onde a plataforma de ensaios se encontra na posição 0 graus. Desta forma, a tensão normal é oriunda dos pesos de confinamento mais o peso da camada de solo. Já a tensão cisalhante deve-se, exclusivamente, aos pesos depositados na plataforma de aplicação de cargas. Assim, as equações que definem a resistência ao cisalhamento são:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (18)$$

$$\tau = \frac{C}{A} \quad (19)$$

5.6. Programa de Ensaio

O desenvolvimento desta pesquisa se constituiu da realização de um amplo programa de ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado, o

qual foi associado aos ensaios apresentados por Aguiar (2003) e Rezende (2005), executados na configuração original de ensaio de rampa (RP100Q-5) e por Tavares (2008) na configuração atual (RP50R-10 e CI50R-10).

5.6.1. Ensaio da Tese

O programa de ensaios desta pesquisa contempla a realização de ensaios de rampa, cisalhamento inclinado e cisalhamento direto, utilizando as configurações anteriormente descritas no Capítulo 4. As Tabelas 28, 29 e 30 resumem os programas de ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e cisalhamento direto inclinado.

Para os três tipos de ensaios foram utilizadas as diferentes caixas construídas. Os ensaios de rampa empregaram as quatro novas configurações disponíveis (RP25Q-10, RP50Q-10, RP50R-10 e RP100Q-10). Já os ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado utilizaram, somente, as configurações CI25Q-10 e CI50R-10.

Os ensaios de rampa foram executados variando-se a espessura da camada de solo. Utilizaram-se as espessuras de 2,5; 5,0 e 10,0cm. Os ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado foram realizados, somente, com espessura de 5,0cm.

Os ensaios de rampa foram executados variando-se a inclinação das faces frontal e de fundo das caixas, também. Consideraram-se duas metodologias: faces verticais (inclinação nula) e inclinadas de 30° com a vertical. Por sua vez, os ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado foram realizados com as faces, frontal e traseira, das caixas verticais.

Os três tipos de ensaios foram executados com areia (Ar) nas densidades relativas de 15, 45 e 90%. Os geossintéticos adotados foram geomembrana Polimanta (GMPL), geomembrana Cipageo (GMCP) e Geogrelha Fortrac 35 (GG35).

As tensões confinantes (σ_c) variaram entre 1,1 e 5,8kPa considerando a plataforma de ensaio na horizontal.

Tabela 28 - Programa de Ensaios de Rampa

Conf.	FF	Área (m ²)	FC	h (cm)	Interface		
					ensaio	σ_c (kPa)	
	V	0,25	quadrada	2,50	Ar15xAr15	(1,4)(2,1)(2,8)(3,5)	
					Ar15xGMPL	(1,4)(2,1)(2,8)(3,5)(4,6)	
					Ar45xGMPL	(1,4)(2,1)(2,8)	
					Ar90xGMPL	(1,4)(2,1)(2,8)	
					Ar15xGG35	(1,4)(2,1)(2,8)(3,5)(4,6)	
					Ar15xGMCP	(1,4)(2,1)(2,8)	
	RP25Q-10	V	0,25	quadrada	5,00	Ar15xAr15	(1,1)(1,8)(3,2)(5,0)
						Ar15xGMPL	(1,8)(3,2)(5,0)
						Ar15xGG35	(1,1)(1,8)(2,5)(3,3)(5,0)
						Ar15xAr15	(1,6)(2,6)(3,3)(4,0)(4,7)
	V	0,25	quadrada	10,0	Ar15xGMPL	(2,6)(4,0)(5,8)	
					Ar15xGG35	(1,8)(3,3)(4,7)	
					Ar15xAr15	(2,7)(4,3)	
					I	0,22	retangular
					Ar15xGG35	(2,7)(3,5)(4,3)	
RP50Q-10	V	0,50	quadrada	10,0	Ar15xAr15	(1,6)	
					Ar15xGG35	(1,6)	
RP50R-10	V	0,50	retangular	5,00	Ar15xAr15	(1,1)(1,8)(2,5)(3,6)	
					Ar15xGMPL	(1,1)(1,8)(2,5)(3,6)	
		V	0,50	retangular	10,0	Ar15xGG35	(1,1)(1,8)(2,5)(3,6)
						Ar15xAr15	(1,6)(2,6)(3,3)(4,5)
RP100Q-10	V	1,00	quadrada	10,0	Ar15xGMPL	(1,6)(2,6)(3,3)	
					Ar15xGG35	(1,6)	
					Ar15xAr15	(1,6)	
					Ar15xGG35	(1,6)	

Conf.=configuração; FF=inclinação das faces frontal e de fundo da caixa superior - V para faces frontal e de fundo verticais e I para faces frontais e de fundo inclinadas de 30°; FC=forma da caixa; Ar15=areia na densidade relativa de 15%; Ar45=areia na densidade relativa de 45%; Ar90=areia na densidade relativa de 90%; GMPL=geomembrana Polimanta; GMCP=geomembrana Cipageo; GG35=geogrelha Fortrac 35kN/m; h=espessura de solo no interior das caixas de ensaio. Nota: Os valores da tensão normal são os iniciais com a plataforma de ensaios a ZERO graus.

Tabela 29 - Programa de Ensaios de Cisalhamento Direto

Conf.	FF	Área (m ²)	FC	α (°)	Interface	
					ensaio	σ_c (kPa)
CI25Q-10	V	0,25	quadrada	0,00	Ar15xAr15	(1,1)(1,8)(3,2)(4,6)(5,6)(7,0)(8,4)
					Ar15xGMPL	(1,1)(1,8)(3,2)(4,6)(5,6)(7,0)(8,4)
					Ar15xGG35	(1,1)(1,8)(3,2)(4,6)(5,6)(7,0)(8,4)
CI50R-10	V	0,50	retangular	0,00	Ar15xAr15	(1,8)(2,5)(3,6)(5,0)
					Ar15xGMPL	(1,8)(2,5)(3,6)(5,0)
					Ar15xGG35	(1,8)(2,5)(3,6)(5,0)

Conf.=configuração; FF=inclinação das faces frontal e de fundo da caixa superior - V para faces frontal e de fundo verticais e I para faces frontais e de fundo inclinadas de 30°; FC=forma da caixa; Ar15=areia na densidade relativa de 15%; Ar45=areia na densidade relativa de 45%; Ar90=areia na densidade relativa de 90%; GMPL=geomembrana Polimanta; GMCP=geomembrana Cipageo; GG35=geogrelha Fortrac 35kN/m; h=espessura de solo no interior das caixas de ensaio. Nota: Os valores da tensão normal são os iniciais com a plataforma de ensaios a ZERO graus.

Tabela 30 - Programa de Ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado

Conf.	FF	Área (m ²)	FC	α (°)	Interface	
					ensaio	σ_c (kPa)
CI25R-10	V	0,25	quadrada	4,50	Ar15xAr15	(1,8)(3,2)(5,0)
					Ar15xGMPL	(1,8)(3,2)(5,0)
					Ar15xGG35	(1,8)(3,2)(5,0)
	V	0,25	quadrada	9,00	Ar15xAr15	(1,8)(3,2)(5,0)
					Ar15xGMPL	(1,8)(3,2)(5,0)
					Ar15xGG35	(1,8)(3,2)(5,0)
V	0,25	quadrada	18,0	Ar15xAr15	(1,8)(3,2)(5,0)	
				Ar15xGG35	(1,8)(3,2)(5,0)	

Conf.=configuração; FF=inclinação das faces frontal e de fundo da caixa superior - V para faces frontal e de fundo verticais e I para faces frontais e de fundo inclinadas de 30°; FC=forma da caixa; Ar15=areia na densidade relativa de 15%; Ar45=areia na densidade relativa de 45%; Ar90=areia na densidade relativa de 90%; GMPL=geomembrana Polimanta; GMCP=geomembrana Cipageo; GG35=geogrelha Fortrac 35kN/m; h=espessura de solo no interior das caixas de ensaio. Nota: Os valores da tensão normal são os iniciais com a plataforma de ensaios a ZERO graus.

Tabela 30 (cont.) - Programa de Ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado

Conf.	FF	Área (m ²)	FC	α (°)	Interface	
					ensaio	σ_c (kPa)
CR50R-10	V	0,50	retangular	4,50	Ar15xGMPL	(1,8)(2,5)(3,6)
	V	0,50	retangular	9,00	Ar15xAr15	(1,8)(2,5)(3,6)
					Ar15xGG35	(1,8)(2,5)(3,6)
					Ar15xAr15	(1,8)(2,5)(3,6)
V	0,50	retangular	18,0	Ar15xGG35	(1,8)(2,5)(3,6)	

Conf.=configuração; FF=inclinação das faces frontal e de fundo da caixa superior - V para faces frontal e de fundo verticais e I para faces frontais e de fundo inclinadas de 30°; FC=forma da caixa; Ar15=areia na densidade relativa de 15%; Ar45=areia na densidade relativa de 45%; Ar90=areia na densidade relativa de 90%; GMPL=geomembrana Polimanta; GMCP=geomembrana Cipageo; GG35=geogrelha Fortrac 35kN/m; h=espessura de solo no interior das caixas de ensaio. Nota: Os valores da tensão normal são os iniciais com a plataforma de ensaios a ZERO graus.

As campanhas de ensaios procuram avaliar as seguintes influências: geometria das caixas de ensaio (tamanho, forma, altura de solo no interior das caixas de ensaio), ângulo de inclinação da rampa, materiais envolvidos (densidade relativa e tipo de geossintético) e tensão confinante.

Também são avaliadas as eficiências de cada interface em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço, de acordo com as seguintes expressões:

$$E_{\phi} = \frac{\tan \phi_{sg}}{\tan \phi} \quad (19)$$

$$E_c = \frac{a}{c} \quad (20)$$

onde:

E_{ϕ} = eficiência da interface em função de ângulo de atrito;

ϕ_{sg} = ângulo de atrito da interface solo-geossintético;

ϕ = ângulo de atrito do solo;

E_c = eficiência da interface em função de adesão;

a = adesão da interface solo-geossintético;

c = coesão do solo.

5.6.2. Ensaio Pré-existent

A configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 já foi estudada por Aguiar (2003) e Rezende (2005). Nas suas campanhas de ensaios foram avaliados o desempenho da configuração e as influências dos tipos de solo, de geossintéticos, densidade relativa e tensão confinante.

Os autores empregaram nos seus trabalhos, três solos e quatro geossintéticos. Os solos foram um silte, um pedregulho (Brita nº1) e a mesma areia utilizada nesta pesquisa. Os geossintéticos foram o geotêxtil não-tecido Ober G300, a geomembrana Cipageo e as geogrelhas Fortrac 35 e 55. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados nos Apêndices VI e VII.

As configurações de ensaio de rampa RP50R-10 e de cisalhamento inclinado CI50R-10, desenvolvidas neste trabalho, foram utilizadas por Castro (2008). Nos seus estudos foram empregados um pedregulho (Brita nº0) e dois dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa (geogrelha Fortrac 35 e a geomembrana Polimanta).

A autora avaliou a influência do tipo de geossintético, do tipo de solo, da tensão confinante e do tipo de ensaio. O Apêndice VIII apresenta mais detalhes sobre a pesquisa de Tavares (2008).

Este banco de ensaios vai ser incorporado ao trabalho a fim de complementar a análise de resultados de ensaio de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado.

5.7. Considerações Finais

Para a realização dos ensaios da tese foram escolhidos um solo e três tipos de geossintéticos. Os solos consistem de uma areia angulosa, areia da Praia de Ipanema, e os geossintéticos são duas geomembranas (uma de PVC e uma de PEAD) e uma geogrelha.

A metodologia de montagem dos corpos de prova é idêntica, independentemente do tipo de ensaio. Porém, as metodologias de ensaios e análise apresentam particularidades inerentes a cada um dos ensaios.

O programa de ensaios considera a utilização de algumas das configurações de ensaio descritas no Capítulo 4. Os objetivos são avaliar a influência das condições de contorno, obter os parâmetros de interface (adesão e ângulo de atrito de interface) e eficiências de interface.

Nas análises foram, também, incorporados os resultados de ensaios já realizados por Aguiar (2003), Rezende (2005) e Tavares (2008).

6. Resultados e Análises: Verificações Iniciais

6.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas e analisadas as verificações iniciais realizadas nesta tese. Elas incluem a precisão do equipamento, influência das dimensões das caixas, influência da metodologia de ensaios e desgaste da geomembrana.

Primeiramente foi proposto um critério de ruptura unificado para os três ensaios baseado no critério de ruptura do ensaio de rampa previsto na Norma Européia ISO 12957-2 e nas observações de Pitanga *et al.* (2007).

A avaliação da precisão ou acurácia do equipamento foi feita utilizando-se um conjunto de ensaios que apresentam características idênticas, tais como, mesmo solo, mesma densidade relativa, mesma interface solo-geossintético ou solo-solo. Esta análise foi realizada para algumas das configurações de ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado.

A avaliação da influência das dimensões das caixas de ensaio foi realizada considerando-se o aumento ou diminuição da área de contato, variação da forma da área de contato e variação da espessura da camada de solo no interior da caixa de ensaio.

A influência de metodologia de ensaio foi avaliada somente em uma das configurações de ensaio de rampa (RP25Q-10). Ela consistiu em comparar as envoltórias de resistência obtidas para ensaios realizados com as faces internas (frontal e traseira) na vertical e faces inclinadas de 30° com a vertical.

Foi verificada também a influência do desgaste e do dano da geomembrana nos valores dos parâmetros de interfaces obtidos pelos diferentes ensaios. A avaliação consistiu em comparar envoltórias obtidas com amostras novas, amostras com uso controlado e amostras com uso excessivo .

Sempre que possível foram utilizados os resultados reportados por Aguiar (2003), Rezende (2005) e Tavares (2008).

6.2. Critério de Ruptura Unificado

Todos os ensaios deste trabalho são expressos em termos de curvas tensão cisalhante vs deslocamento. As Figuras 177 a 179 apresentam resultados típicos de ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado, respectivamente.

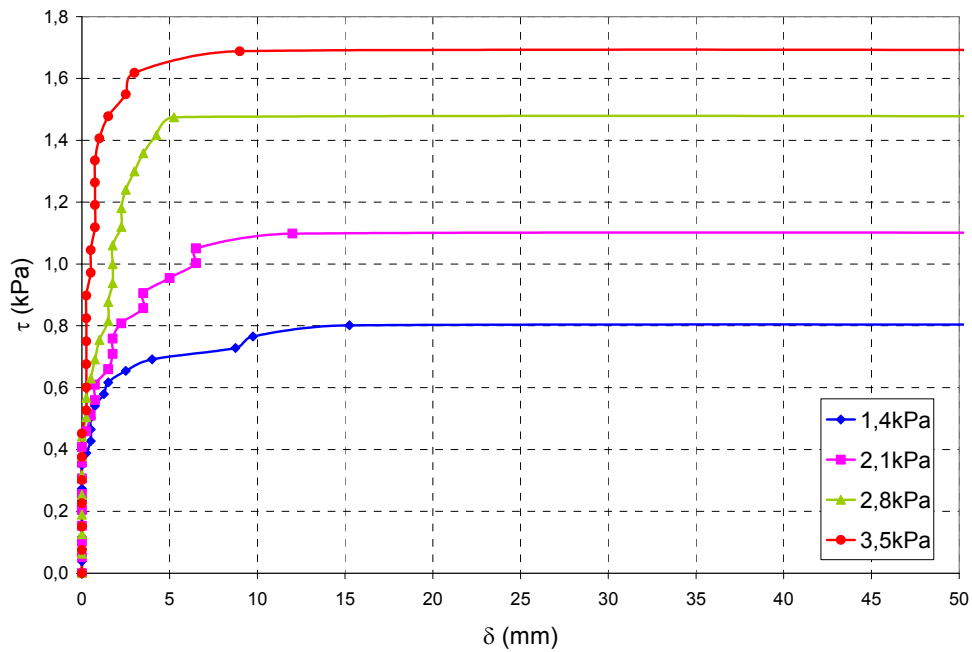


Figura 177 - Resultados típicos de ensaios de rampa - interface Ar15 x Ar15.

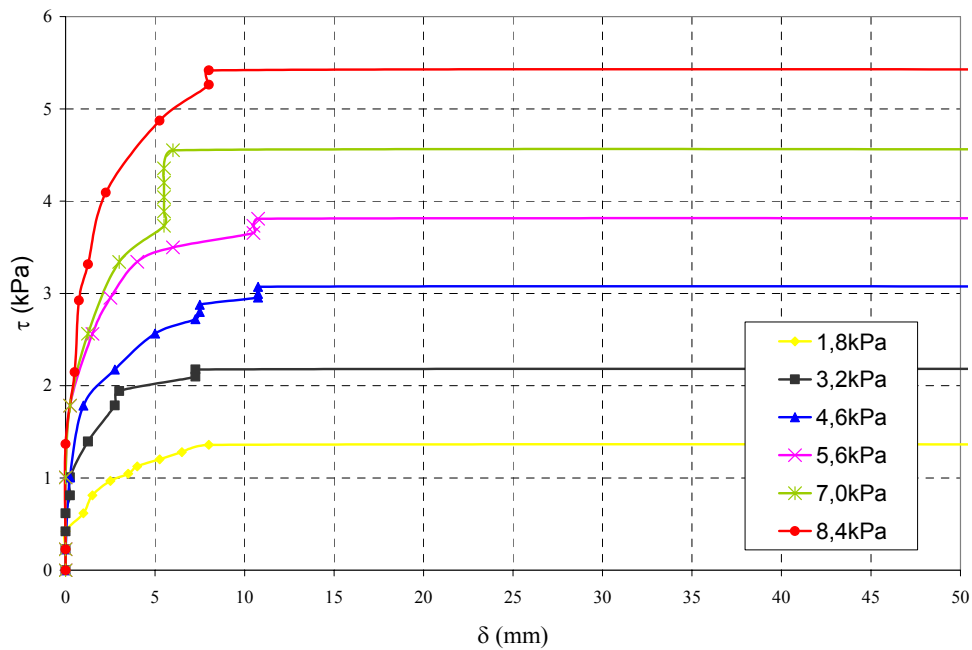


Figura 178 - Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto convencional - interface Ar15 x GG35.

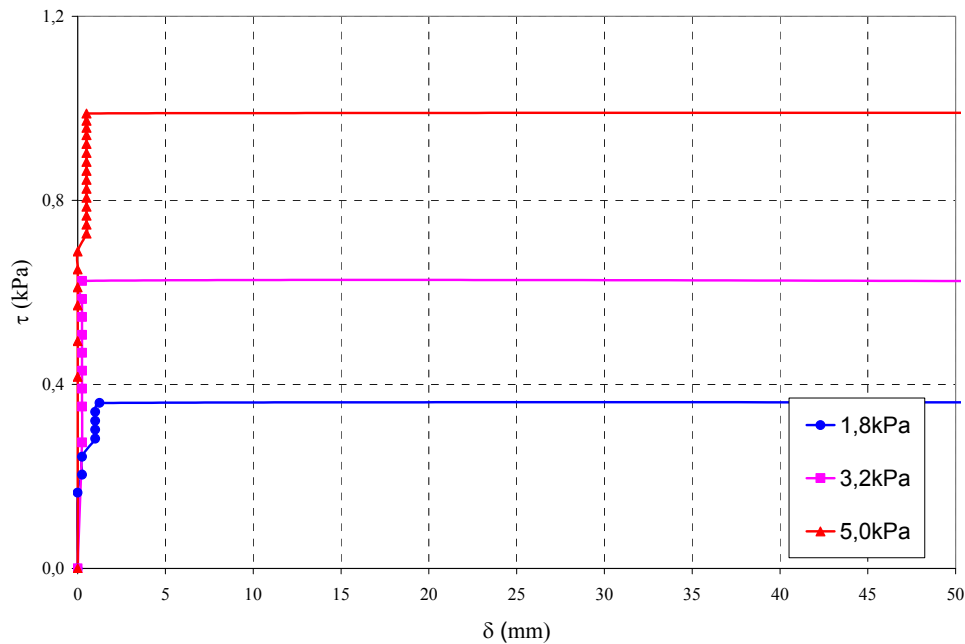


Figura 179 - Resultados típicos de ensaios de cisalhamento direto inclinado - Ar15 x GMPL.

A uniformização da apresentação dos resultados trouxe como benefício à possibilidade de padronização do critério de ruptura. Observa-se que, independente do tipo de ensaio e tensão confinante, as curvas τ vs δ não mostram pico de resistência. Este comportamento é típico de ensaios de cisalhamento com força controlada (para deformação controlada ver Anexo I). Normalmente utiliza-se como critério de ruptura uma deformação limite (como sugerido na Norma ISO 12957-2), entretanto, outras considerações podem ser feitas.

Sobre a forma de interpretação de ensaios de rampa, Pitanga *et al.* (2007) fazem algumas considerações que também podem ser aplicadas aos ensaios de cisalhamento direto convencional e inclinado.

Segundo estes autores, o comportamento da interface solo-geossintético, em ensaios de rampa, pode ser dividido em três fases (Figura 180). Identifica-se uma fase estática (Fase 1), na qual a caixa de ensaio superior permanece imóvel sobre a plataforma de ensaio ($\delta=0$) até alcançar um ângulo $\alpha=\alpha_0$, onde α_0 é o ângulo de início de movimento (Figura 180a). A fase transitória corresponde a Fase 2, na qual para um incremento da inclinação α (para $\alpha>\alpha_0$), a caixa superior se move (Figura 180b). A fase do deslizamento não estabilizado é a última fase (Figura

180c), onde a caixa superior sofre um deslizamento não estabilizado a uma velocidade crescente, ainda que a inclinação seja mantida constante ($\alpha = \alpha_s$).

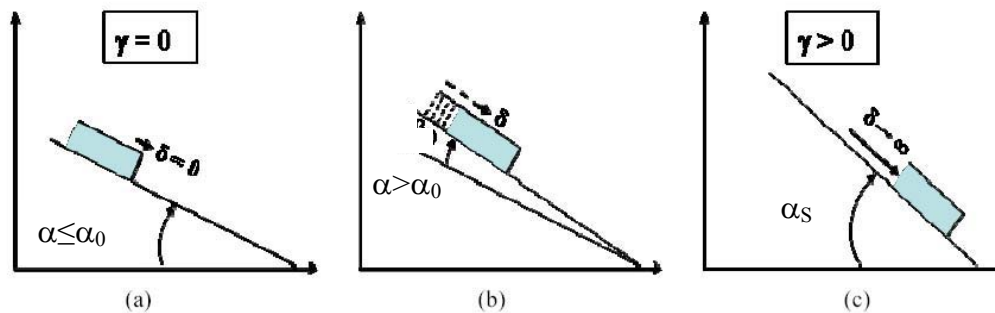
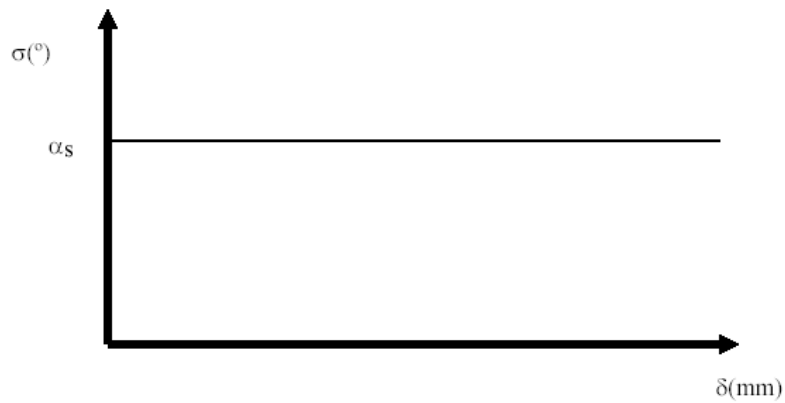


Figura 180 - Fases do movimento do elemento superior da interface com o aumento da inclinação α do plano inclinado: (a) fase 1, fase estática; (b) fase 2, fase transitória; (c) fase 3, fase de deslizamento não estabilizado (Pitanga *et al.*, 2007).

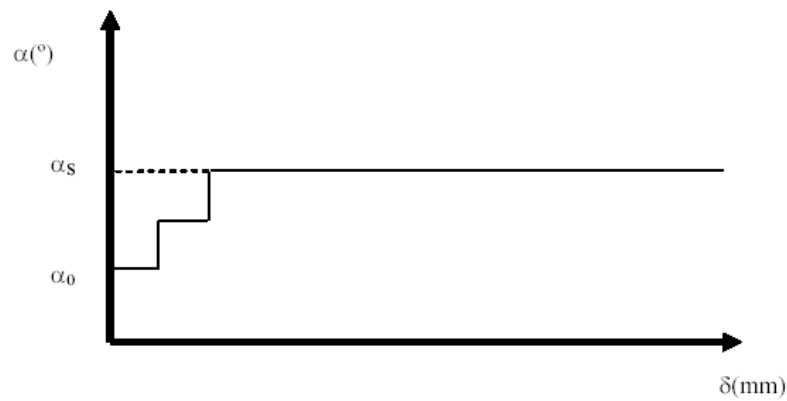
Por sua vez a fase transitória (Fase 2) também é subdividida em três padrões de deslizamento (Figura 181):

- (i) Deslizamento súbito, na qual a caixa superior desliza de forma não estabilizada sem uma fase transitória expressiva (Figura 181a);
- (ii) Deslizamento irregular, onde o deslocamento aumenta acompanhado de rupturas progressivas (Figura 181b);
- (iii) Deslizamento gradual, onde o deslocamento aumenta progressivamente com o aumento de inclinação (Figura 181c).

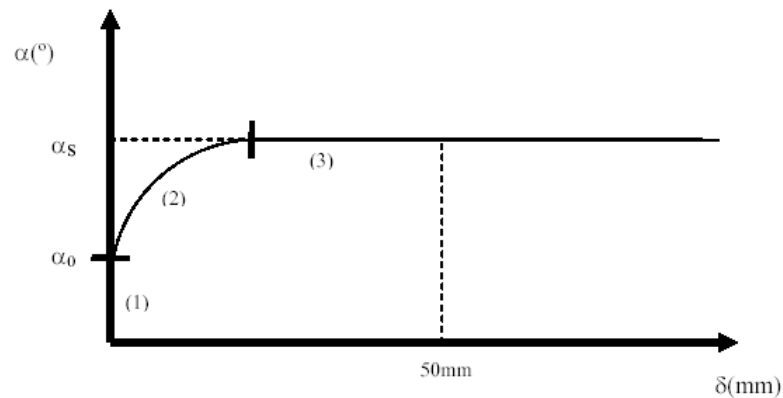
A Norma Européia ISO 12957-2 especifica que o ângulo de rampa de ruptura é o ângulo correspondente a 50mm de deslocamento. Porém, como observam Pitanga *et al.* (2007), o ângulo de rampa de ruptura ocorre, frequentemente, para um deslocamento inferior ao especificado pela norma. Desta forma, o ângulo de ruptura foi determinado nesta pesquisa segundo um dos três padrões de deslizamento apresentados na Figura 181. Na impossibilidade de identificar o padrão de deslizamento, utilizou-se a recomendação da norma ISO 12957-2 (caso C da Figura 181).



(a)



(b)



(c)

Figura 181 - Diferentes mecanismos de deslizamento observados nos ensaios: (a) deslizamento súbito; (b) deslizamento irregular; (c) deslizamento gradual.

A forma de interpretação do ensaio de rampa foi extrapolada para os ensaios de cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado, pois os mesmos padrões de deslizamento foram observados. Entretanto, em vez de se utilizar o ângulo de ruptura, utilizou-se a tensão cisalhante de ruptura. Para fins de padronização, o ensaio de rampa também foi analisado em termos de tensão cisalhante de ruptura.

Analogamente, na impossibilidade da utilização de um destes padrões de deslizamento, a tensão cisalhante de ruptura foi a equivalente a 50mm de deslocamento.

6.3. Precisão do Equipamento

A avaliação da precisão do equipamento ou aferição foi feita utilizando-se um conjunto de ensaios que apresentam características idênticas, tais como, mesmo solo, mesma densidade relativa, mesma interface solo-geossintético ou solo-solo. Empregaram-se quatro configurações de ensaio de rampa e uma de cisalhamento direto inclinado. A Tabela 30 apresenta resultados de ensaios de rampa para as interfaces Ar15 x GG35 e Ar15 x Ar15, os resultados reportados por Aguiar (2003) com interfaces que utilizam silte (Si) e os de Rezende (2005) com interfaces que utilizam areia na DR=45%. A Tabela 31 apresenta os resultados para uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado utilizando a interface Ar15 x GMPL. Nestas tabelas os resultados utilizados na avaliação da acurácia do equipamento são apresentados em termos de ângulo de inclinação de plataforma de ensaios (α), tensão normal (σ) e cisalhante (τ), razão entre as tensões principais (τ/σ) e ângulo de atrito secante (ϕ_{sec}). São apresentados, também, os valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados calculados a partir dos ângulos de atrito secante.

A média foi calculada por meio da expressão seguinte:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (21)$$

onde:

\bar{X} = média aritmética;

x_i = representa cada uma das n observações;

n = número de observações.

Por sua vez, o desvio padrão foi calculado igual a:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (22)$$

onde:

S = desvio-padrão;

\bar{X} = média aritmética;

x_i = representa cada uma das n observações;

n = número de observações.

O coeficiente de variação é o resultado da divisão do desvio-padrão pela média aritmética, cujo valor mostra o quão maior (ou menor) o desvio padrão é da média. O coeficiente de variação dá uma idéia da regularidade ou homogeneidade das amostras que estão sendo estudadas. Valores elevados, superiores a 100%, representam uma amostra com grande heterogeneidade e valores inferiores a 40% refletem homogeneidade da amostra (Andriotti, 2003).

Em relação aos ensaios de rampa, observa-se que o ângulo de atrito secante apresentou maiores variações nos conjuntos de ensaios Ar15 x GG35, configuração RP50Q-10 e Ar15 x GMCP, configuração RP100Q-5. Em relação aos ensaios de cisalhamento para interface Ar15 x GMPL, observa-se que a maior variação do ângulo de atrito secante ocorre para o conjunto de ensaios sob ação da menor tensão confinante.

Os maiores coeficientes de variação obtidos nestas duas situações são de 7%, ensaio de rampa, e 8,3%, ensaio de cisalhamento direto inclinado, sendo considerados toleráveis (Andriotti, 2003). Essa dispersão de resultados pode ser explicada pela rusticidade do sistema de aplicação de cargas do ensaio de cisalhamento direto inclinado e simplicidade da instrumentação utilizada no ensaio de rampa.

Tabela 31 - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	α			Tensões na Ruptura			Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
			(graus)	σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ	ϕ_{sec} (graus)				
RP25Q-10	Ar15 x Ar15	1	23	1,47	0,95	0,65	32,9	33,1	0,48	1,45	
		2	23	1,47	0,95	0,65	32,9				
		3	23	1,47	0,95	0,65	32,9				
		4	23	1,47	0,95	0,65	32,9				
		5	24	1,45	0,99	0,68	34,1				
RP25Q-10	Ar15 x GG35	1	21	1,31	0,80	0,61	31,4	31,4	2,20	7,01	
		2	19	1,33	0,73	0,55	28,7				
		3	23	1,29	0,87	0,68	34,1				
RP50Q-10	Ar15 x Ar15	1	25	1,47	0,92	0,62	32,0	31,6	0,57	1,80	
		2	25	1,47	0,92	0,62	32,0				
		3	24	1,48	0,88	0,60	30,8				
RP50R-10	Ar15 x GG35	1	23	1,48	0,86	0,58	30,0	28,9	0,94	3,25	
		2	21	1,49	0,78	0,52	27,7				
		3	22	1,48	0,82	0,55	28,9				

Tabela 31 (cont.) - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	α			Tensões na Ruptura			Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
			(graus)	σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ	φ _{sec.} (graus)				
RP100Q-5	Ar45 x GMPC	1	22	1,90	0,86	0,45	24,3	24,3	0,00	0,00	
		2	22	1,90	0,86	0,45	24,3				
		3	22	1,90	0,86	0,45	24,3				
RP100Q-5	Ar45 x GMPC	1	21	3,02	1,24	0,41	22,4	24,1	1,29	5,35	
		2	23	2,98	1,36	0,46	24,5				
		3	24	2,96	1,41	0,48	25,5				
RP100Q-5	Si100 x GT30	1	37	0,74	0,70	0,95	43,4	43,3	1,18	2,73	
		2	37	0,74	0,70	0,95	43,4				
		3	39	0,72	0,73	1,02	45,5				
		4	36	0,75	0,68	0,91	42,4				
		5	37	0,74	0,70	0,95	43,4				
		6	35	0,76	0,67	0,88	41,3				
		7	37	0,74	0,70	0,95	43,4				
RP100Q-5	Si100 x Si100	1	52	0,57	0,92	1,61	58,1	55,9	1,58	2,83	
		2	49	0,61	0,88	1,45	55,3				
		3	48	0,62	0,86	1,40	54,4				

Tabela 31 (cont.) - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	α (graus)	Tensões na Ruptura			Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
				σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ			
RP100Q-5	Si100 x Si100	1	43	3,29	3,23	0,98	44,5	1,46	3,36
		2	43	3,29	3,23	0,98	44,5		
		3	40	3,45	3,04	0,88	41,4		
RP100Q-5	Si100 x GG55	1	45	0,65	0,82	1,26	51,5	0,94	1,87
		2	43	0,68	0,79	1,17	49,5		
		3	43	0,68	0,79	1,17	49,5		
RP100Q-5	Si100 x GG55	1	44	3,24	3,29	1,02	45,5	1,46	3,28
		2	44	3,24	3,29	1,02	45,5		
		3	41	3,39	3,10	0,91	42,4		
RP100Q-5	Si100 x GMCP	1	33	0,78	0,63	0,82	39,2	0,99	2,48
		2	35	0,76	0,67	0,88	41,3		
		3	33	0,78	0,63	0,82	39,2		
RP100Q-5	Si100 x GMCP	1	31	3,85	2,44	0,63	32,3	0,82	2,46
		2	33	3,77	2,58	0,68	34,3		
		3	32	3,81	2,51	0,66	33,3		

Tabela 31 (cont.) - Ensaios utilizados na avaliação do desempenho do equipamento

Configuração	Interface	Ensaio	α (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)	Média (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de Variação (%)
				σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ				
RP100Q-10	Ar15 x Ar15	1	26	1,45	0,87	0,60	30,9	31,3	0,52	1,66
		2	27	1,44	0,90	0,63	32,0			
		3	26	1,45	0,87	0,60	30,9			
RP100Q-10	Ar15 x GG35	1	26	1,45	0,87	0,60	30,9	31,6	0,52	1,65
		2	27	1,44	0,90	0,63	32,0			
		3	27	1,44	0,90	0,63	32,0			
CI25Q-10	Ar15 x GMPL	1	0	1,80	0,51	0,28	15,8	17,8	1,48	8,31
		2	0	1,80	0,60	0,33	18,4			
		3	0	1,80	0,63	0,35	19,3			
CI25Q-10	Ar15 x GMPL	1	0	8,41	2,76	0,33	18,2	18,1	0,14	0,77
		2	0	8,41	2,76	0,33	18,2			
		3	0	8,41	2,72	0,32	17,9			

6.4. Influência das Dimensões das Caixas de Ensaio

Os resultados dos ensaios podem ser influenciados pelas características do equipamento (Figura 182), tais como tamanho da área de contato da amostra, forma da área de contato da amostra, altura de solo no interior da caixa de ensaio e o sistema de confinamento. Nesta pesquisa, o sistema de confinamento é sempre por gravidade e, portanto, somente a geometria das caixas pode influenciar os resultados dos ensaios.

Para avaliar a influência da geometria das caixas de ensaio sobre os resultados, adotou-se o seguinte procedimento: variou-se a dimensão em estudo, mantendo-se as demais dimensões constantes.

Esta avaliação teve como objetivo otimizar o uso do equipamento, ou seja, usar o menor tamanho possível de caixa de ensaio desde que não comprometesse os resultados.

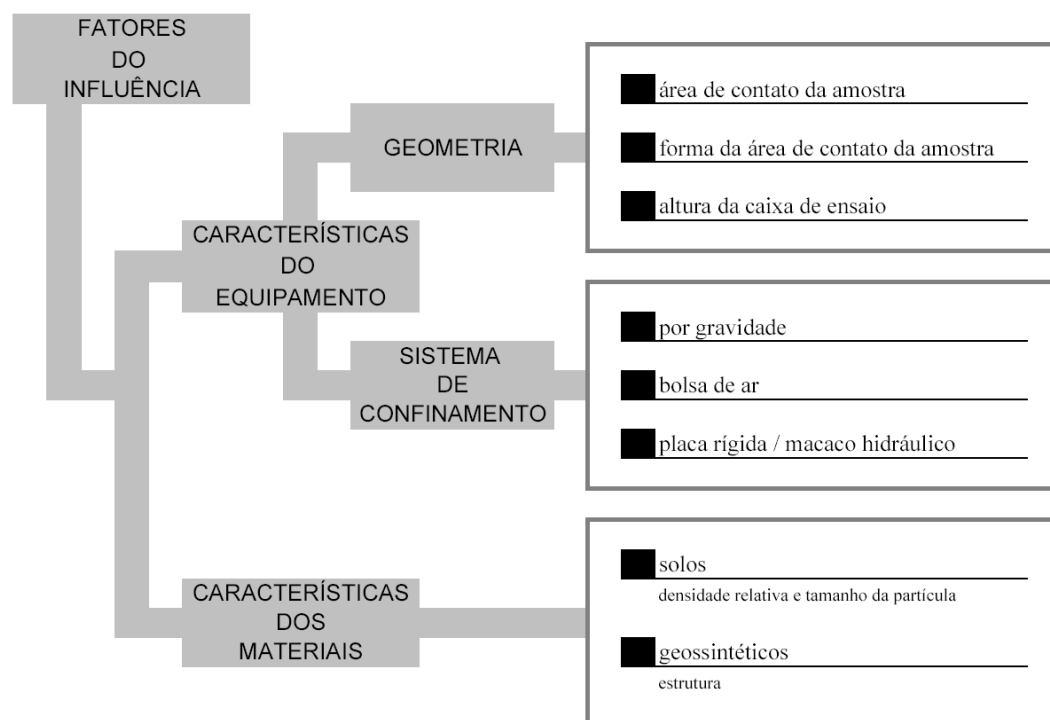


Figura 182 - Fatores que influenciam os resultados dos ensaios.

6.4.1.

Variação da Espessura de Solo no Interior das Caixas de Ensaio

A variação da espessura de solo no interior das caixas de ensaio foi realizada somente nos ensaios de rampa, entretanto também se aplica ao ensaio de cisalhamento direto inclinado. Conforme os estudos numéricos e analíticos feitos por Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002), a distribuição da tensão normal varia durante o ensaio, sendo função da razão entre o comprimento e a altura da caixa de ensaio. Segundo os autores, as dimensões da amostra contribuem significativamente, sendo o seu efeito mais evidente em equipamentos de pequenas dimensões. Os autores sugerem que esta razão seja de no mínimo 20, pois menores valores poderiam comprometer os resultados dos ensaios.

A formulação analítica, descrita no Item 3.2.3, foi aplicada nas cinco configurações de ensaio de rampa e os resultados foram expressos na forma de ábacos. No topo do ábaco encontram-se pequenas tabelas com a espessura de solo h (cm), a razão comprimento da caixa superior de ensaio *vs* espessura de solo e as tensões normal média, máxima e mínima unitárias ao longo da interface para os ângulos de 0, 15, 30 e 45 graus. Estes valores são plotados na forma de curvas comprimento normalizado *vs* tensão normal unitária.

A Figura 183 apresenta os ábacos para a configuração de ensaios de rampa RP25Q-10. As retas em vermelho indicam que, para cada inclinação, a espessura de solo acarreta uma diferença considerável de tensão entre a frente e a traseira da caixa de ensaio, que pode comprometer o resultado do ensaio.

O Apêndice IX apresenta o mesmo estudo para as outras configurações de ensaio de rampa.

Para estudar a influência desta relação, realizou-se uma série de ensaios variando-se a espessura de solo no interior da caixa de ensaio conforme a Figura 184.

h = 2,50 cm				h = 5,00 cm				h = 7,50 cm				h = 10,0 cm			
	d/h	20,0			d/h	10,0			d/h	6,67			d/h	5,00	
α	σ_{\max}	σ_{med}	σ_{\min}	α	σ_{\max}	σ_{med}	σ_{\min}	α	σ_{\max}	σ_{med}	σ_{\min}	α	σ_{\max}	σ_{med}	σ_{\min}
0	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00
15	1,00	0,97	0,93	15	1,04	0,97	0,89	15	1,08	0,97	0,85	15	1,12	0,97	0,81
30	0,94	0,87	0,79	30	1,02	0,87	0,72	30	1,09	0,87	0,64	30	1,17	0,87	0,57
45	0,81	0,71	0,60	45	0,92	0,71	0,50	45	1,03	0,71	0,39	45	1,13	0,71	0,28

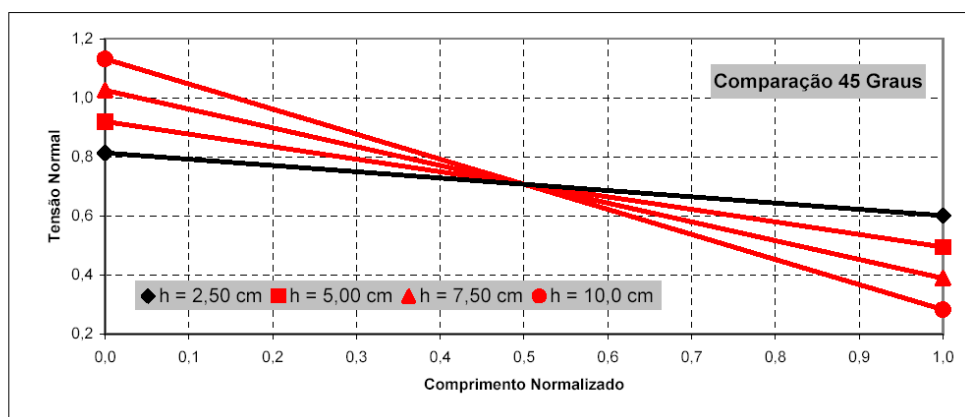
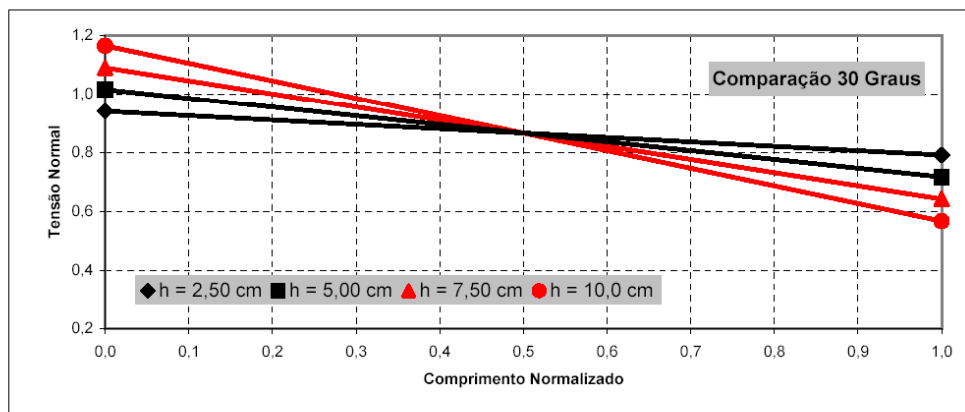
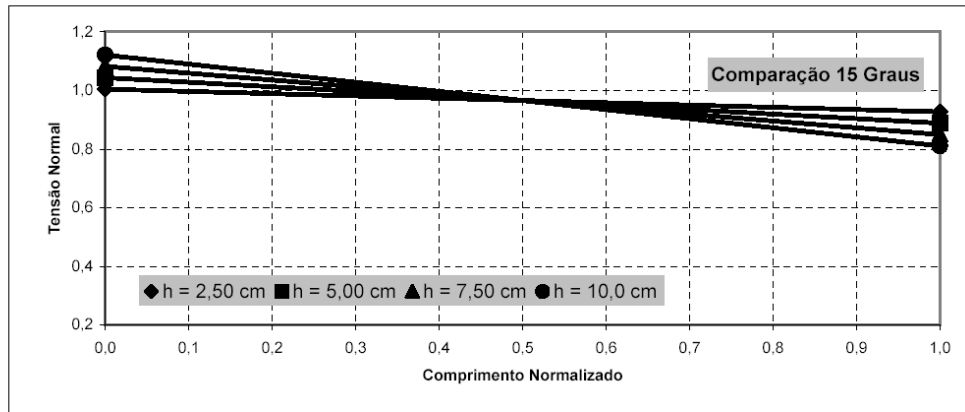


Figura 183 - Distribuição de tensões para a configuração de ensaio de rampa RP25Q-10.

Para esse estudo foram utilizadas as configurações de ensaio de rampa RP25Q-10 e RP50R-10. As configurações de RP100Q-5 e RP100Q-10 foram projetadas e construídas seguindo as recomendações de Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002) e não serão utilizadas. Além disso, estas configurações

apresentam a mesma relação comprimento vs altura da configuração RP50R-10. A configuração RP50Q-10 não foi utilizada, visto que ela representa uma condição intermediária entre a RP25Q-10, mais crítica, e RP50R-10, menos crítica, no que se refere a distribuição de tensões ao longo da interface. A Tabela 32 apresenta as envoltórias analisadas para avaliar a influência da relação comprimento vs altura.

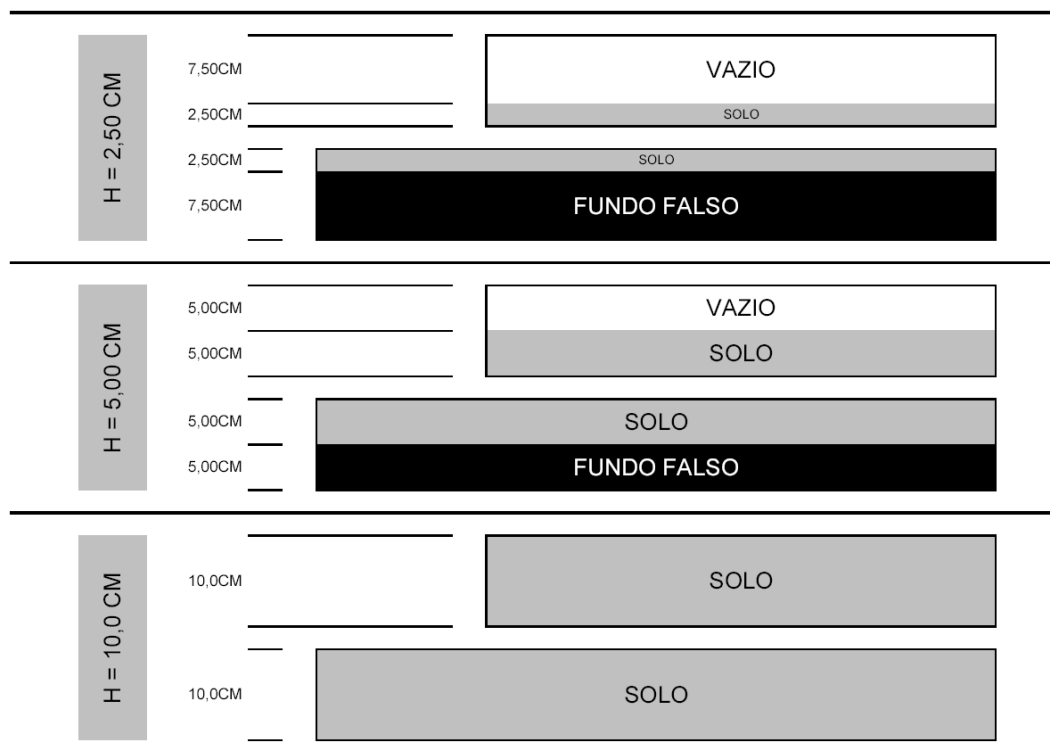


Figura 184 - Variação da altura de solo na caixa de ensaio - Configuração RP25Q-10.

Tabela 32 - Programa de ensaios para estudo da razão comprimento vs altura

Configuração	Espessura da		Relação	Interfaces	
	camada de solo h (cm)	L/h			
RP25Q-10	2,50	20	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
	5,00	10	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
	10,0	5	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
RP50R-10	5,00	20	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	Ar15 x GMPL
	10,0	10	Ar15 x Ar15	Ar15 x GG35	~

Nota: L = comprimento da interface (configuração RP25Q-10 L = 50cm, configuração RP50Q-10 L = 100cm)

A partir dos resultados obtidos para as interfaces solo-solo (Figuras 185 a 186), constatou-se que o aumento da espessura da camada de solo provocou um aumento do ângulo de atrito de interface, igual $0,3^\circ$ de $h=2,5\text{cm}$ para $h=5,0\text{cm}$ e de $4,4^\circ$ de $h=5,0\text{cm}$ para $h=10\text{cm}$ (configuração de ensaio RP25Q-10). Comparando-se os valores obtidos nos ensaios $h=2,5\text{cm}$ e $h=10\text{cm}$ constata-se uma diferença de $4,7^\circ$. Para a configuração RP50R-10, a diferença foi de $6,1^\circ$ entre a menor e maior espessura.

É importante notar que os ensaios realizados para a obtenção das envoltórias com $h=2,5\text{cm}$ (RP25Q-10) e $h=5,0\text{cm}$ (RP50R-10) respeitaram o limite de distribuição da tensão normal sugerido por Palmeira *et al.* (2002). Ao contrário dos ensaios com $h=10\text{cm}$ (RP25Q-10) que ficaram comprometidos por não apresentar a distribuição de tensões recomendada. Além disso, os ensaios com tensões confinantes mais altas não respeitam o limite de utilização imposto pelo sistema de confinamento (Item 4.6 do Capítulo 4).

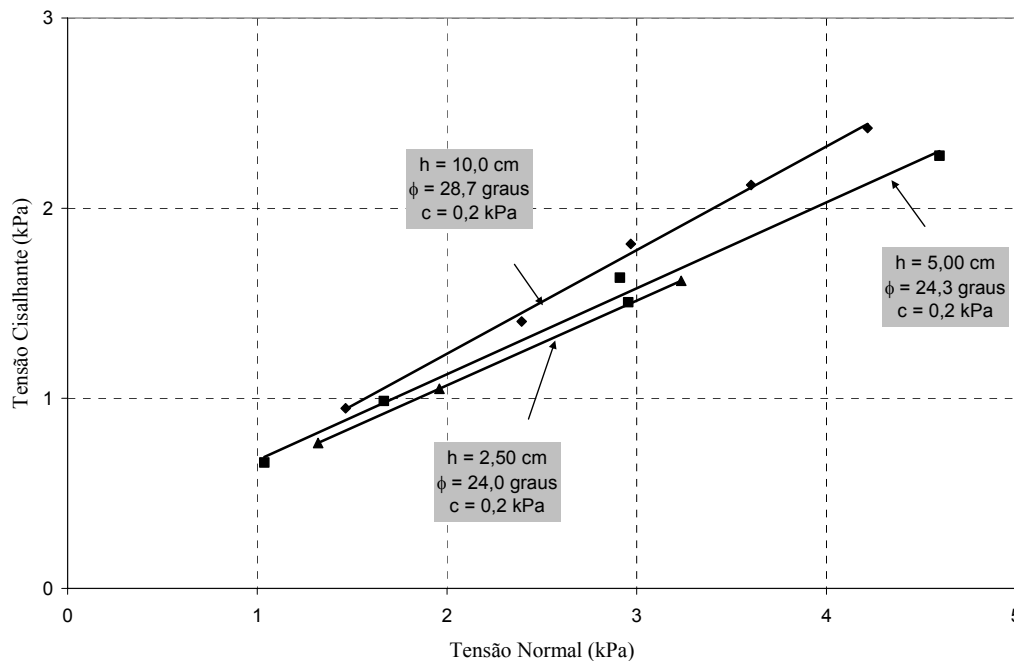


Figura 185 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x Ar15.

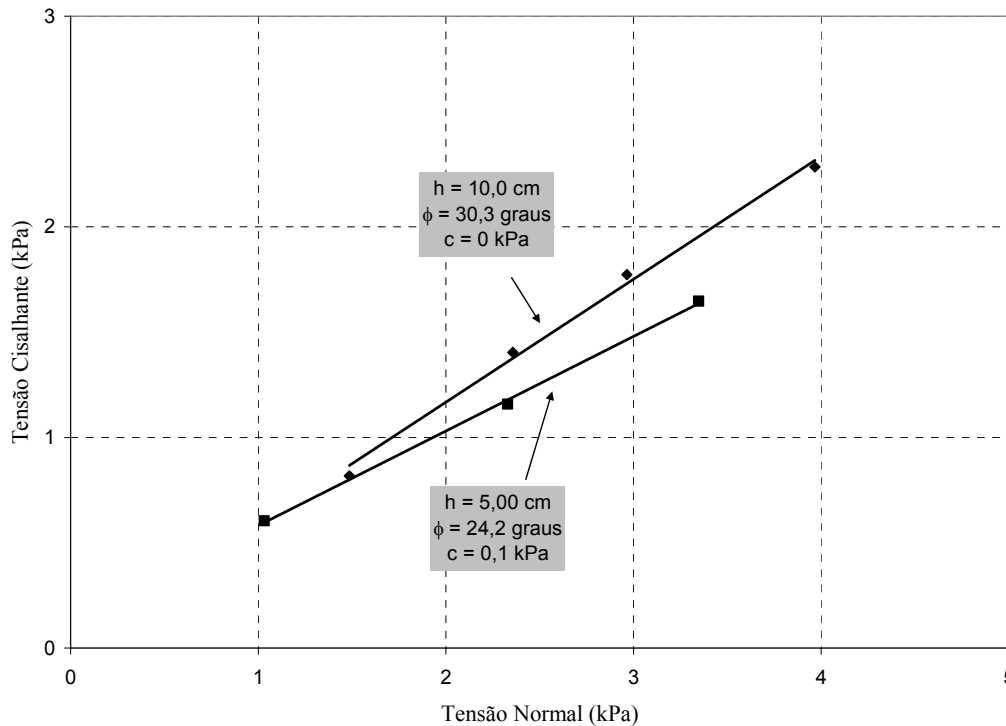


Figura 186 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP50Q-10, interfaces Ar15 x Ar15.

Utilizando a condição ideal de ensaio (Figura 187), relação comprimento da caixa de ensaio vs espessura de solo igual ou superior a 20, ou seja, $h=2,5\text{cm}$ (RP25Q-10) e $h=5,0\text{cm}$ (RP50R-10), constata-se que os valores de ângulo de atrito obtidos são praticamente idênticos. Isso pode ser considerado um indicativo de que a redução do tamanho da caixa de ensaio, respeitando-se os limites de utilização, pode fornecer bons resultados.

Nas Figuras 188 e 189 são apresentados os resultados para interfaces solo-geogrelha. O comportamento é semelhante ao observado para as interfaces solo-solo. A variação do ângulo de atrito de interface é muito reduzida para as espessuras de 2,5 e 5,0cm (RP25Q-10). Porém, para a espessura de 10cm, ela é superior a $2,7^\circ$. Para a configuração RP50R-10, a diferença entre a menor e a maior espessura foi de $2,6^\circ$. A explicação para este comportamento é análoga a das interfaces solo-solo, ou seja, a envoltória de resistência foi obtida de ensaios com espessuras de 10cm que não respeitam nem o limite de distribuição de tensões e nem o limite de utilização do sistema de confinamento (Item 4.7 do Capítulo 4).

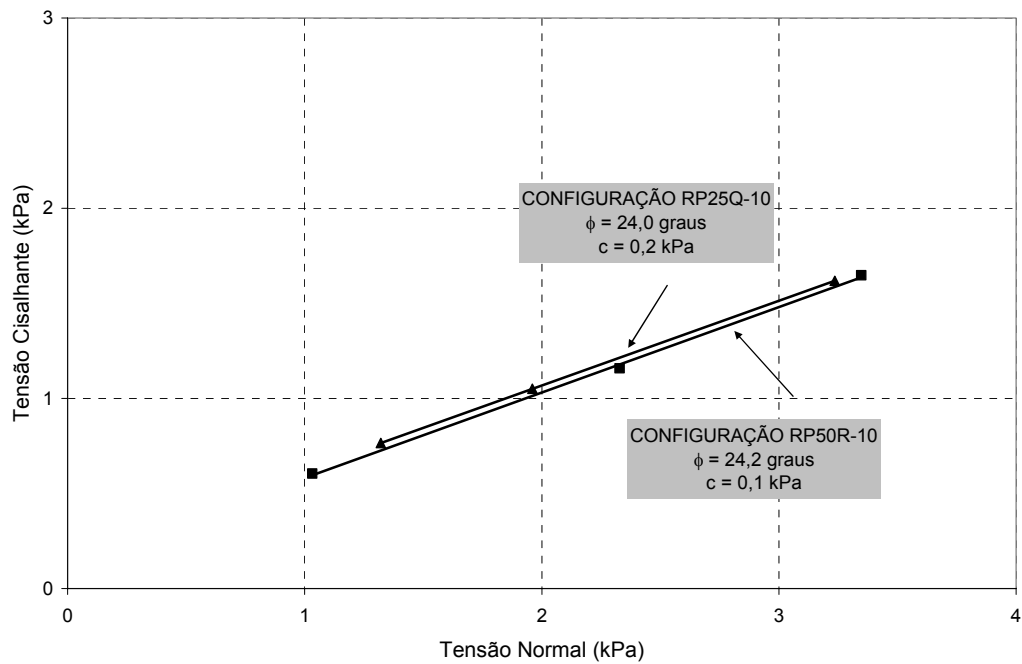


Figura 187 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação $L/h = 20$, interfaces Ar15 x Ar15.

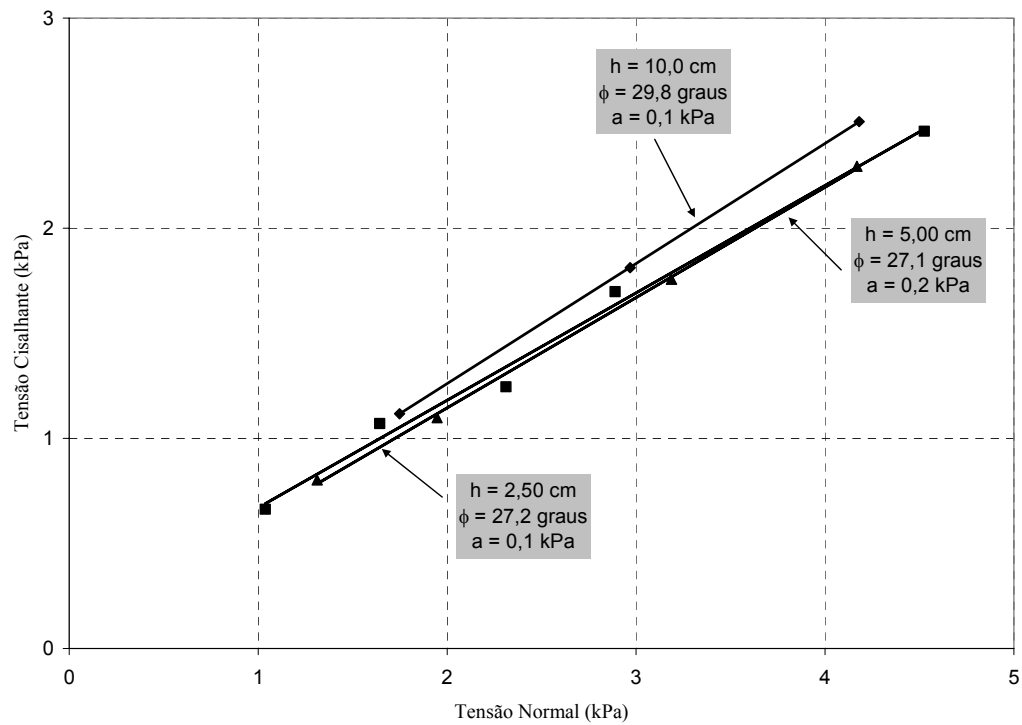


Figura 188 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x GG35.

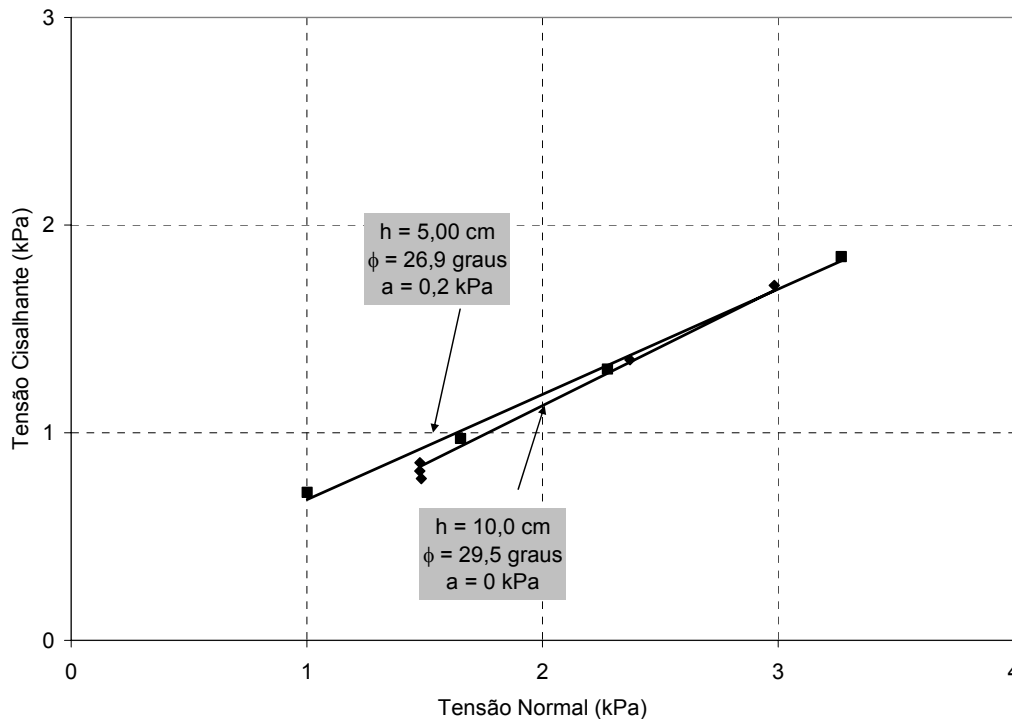


Figura 189 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP50R-10, interfaces Ar15 x GG35.

Analisando-se a condição ideal de ensaio representada na Figura 190, com relação comprimento da caixa de ensaio vs espessura de solo igual ou superior a 20, ou seja, $h=2,5\text{cm}$ (RP25Q-10) e $h=5,0\text{cm}$ (RP50R-10), constata-se que os valores de ângulo de atrito obtidos são praticamente idênticos. Da mesma forma que as interfaces solo-solo, este fato pode ser considerado um indicativo de que a redução do tamanho da caixa de ensaio, respeitando-se os limites de utilização, pode fornecer bons resultados.

As Figuras 191 e 192 apresentam os resultados para interfaces solo-geomembrana. Independente da espessura e configuração de ensaio, o ângulo de atrito de interface obtido é sempre igual 9° . A justificativa para este comportamento esta relacionada à estrutura da geomembrana que apresenta superfície lisa e polida. Estas características induzem uma baixa resistência de interface que, invariavelmente, rompe a ângulos de rampa inferiores a 9° . Para este ângulo não existem restrições de distribuição de tensões e limite de utilização do sistema de confinamento. Desta forma todos os ensaios realizados para diferentes espessuras e configurações são válidos.

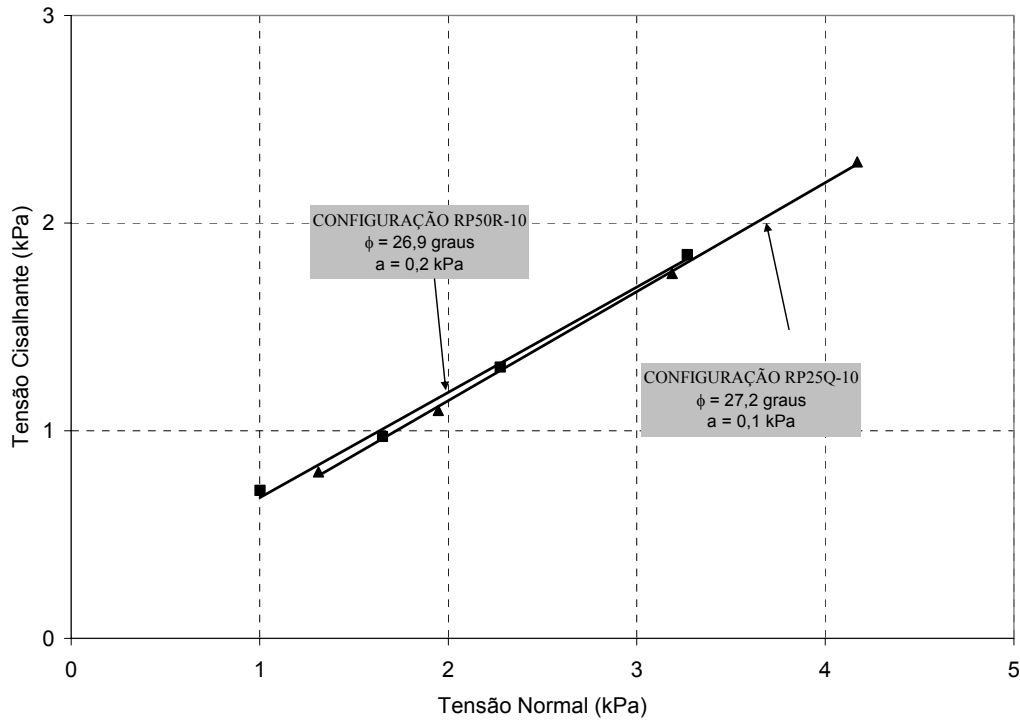


Figura 190 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação $L/h = 20$, interfaces Ar15 x GG35.

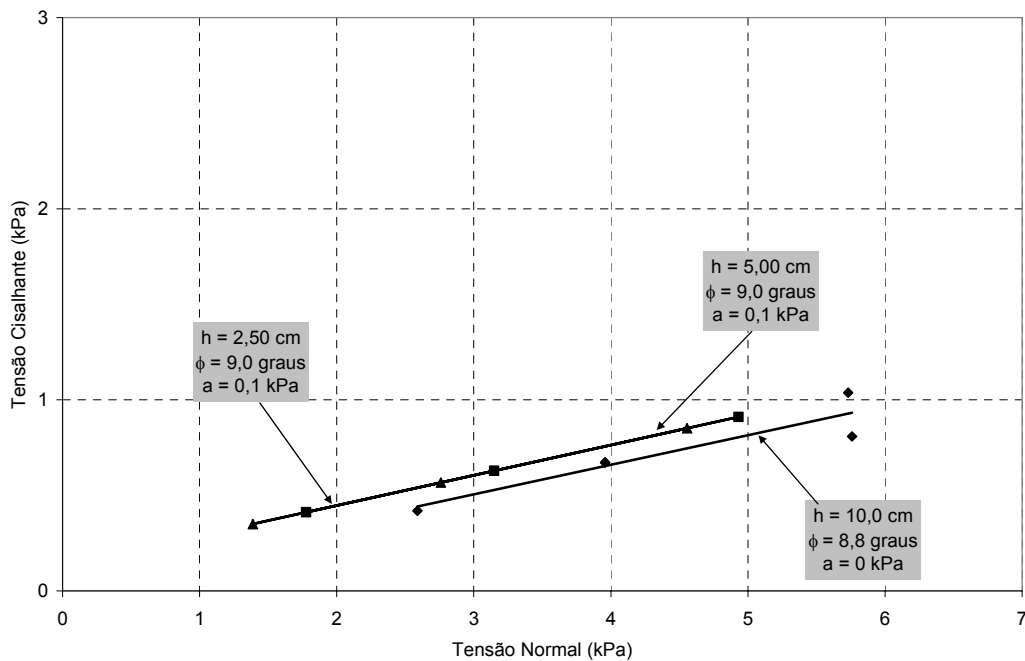


Figura 191 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência para a configuração RP25Q-10, interfaces Ar15 x GMPL.

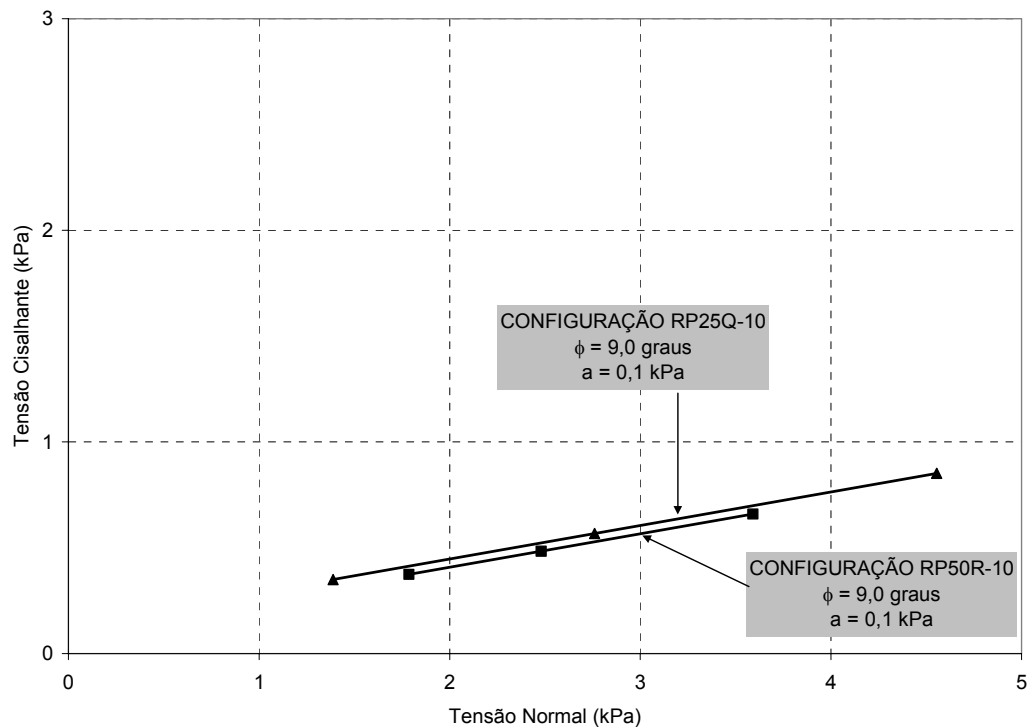


Figura 192 - Comparação dos resultados em termos de envoltória de resistência, para relação $L/h = 20$, interfaces Ar15 x GMPL.

A Tabela 33 apresenta os parâmetros de interfaces obtidos neste estudo. Observa-se, que para as interfaces areia-areia e areia-geogrelha, que o aumento da espessura da camada de solo induz um aumento do ângulo de atrito de interface. Este aumento se deve ao uso incorreto do equipamento, ou seja, os limites de distribuição de tensões e utilização do sistema de confinamento não foram respeitados. A consequência é o travamento da caixa superior, acarretando o aumento do ângulo de rampa e, por sua vez, o aumento do ângulo de atrito de interface.

As interfaces com geomembrana apresentaram um comportamento diferente. Independente do tamanho da caixa de ensaio e espessura da camada de solo estas interfaces apresentam sempre o mesmo comportamento, rompendo a baixos ângulos de rampa. Consequentemente, os limites da distribuição de tensões e restrição do sistema de confinamento não são atingidos. Este comportamento da geomembrana se deve às características de sua superfície, lisa e polida.

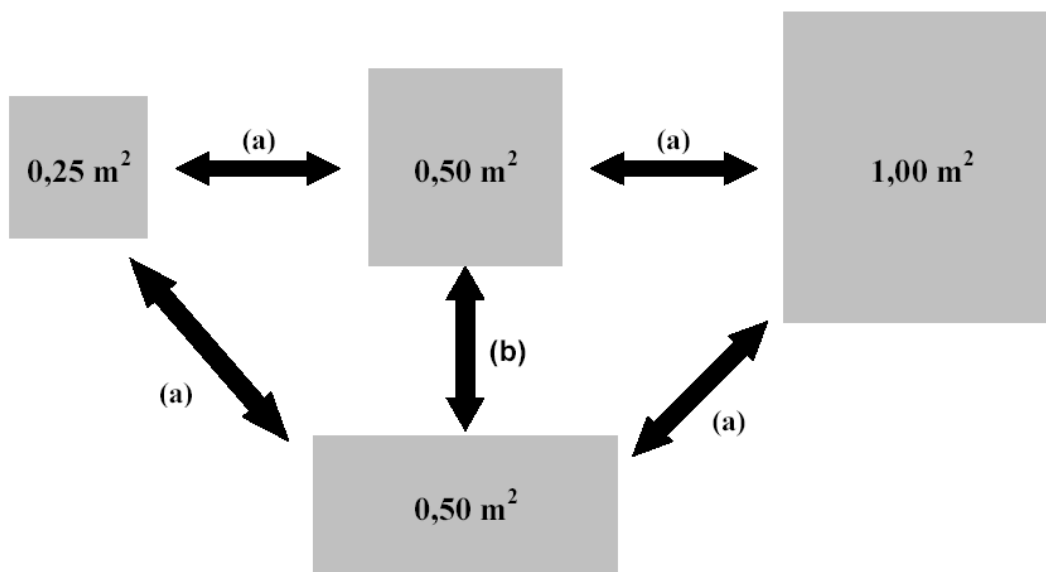
Tabela 33 - Parâmetros de interface obtidos no estudo da influência da relação L/hL

Configuração	Espessura da camada de solo h (cm)	Relação L/h	Interfaces					
			Ar15 x Ar15		Ar15 x GG35		Ar15 x GMPL	
			ϕ (°)	a (kPa)	ϕ (°)	a (kPa)	ϕ (°)	a (kPa)
RP25Q-10	2,50	20	24,0	0,2	27,2	0,1	9,0	0,1
	5,00	10	24,3	0,2	27,1	0,2	9,0	0,1
	10,0	5	28,7	0,2	29,8	0,1	8,8	0,0
RP50R-10	5,00	20	24,2	0,1	26,9	0,2	9,0	0,1
	10,0	10	30,3	0,0	29,5	0,0	~	~

Obs.: L = comprimento da interface; RP25Q-10 L=50cm e RP50R-10 L=100cm.

6.4.2. Variação da Área de Contato

A variação da área de contato pode ser de duas formas: redução (ou aumento) da área de contato mantendo a forma fixa ou alteração da forma mantendo-se a área fixa (Figura 193).



(a) aumento ou diminuição da área de contato

(b) mudança da forma da área de contato

Figura 193 - Variação da forma e tamanho da área de contato.

A avaliação da influência da variação do tamanho e forma da área de contato foi feita para os ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado.

Ensaio de Rampa

A influência da forma e dimensões em ensaios de rampa foi avaliada em duas partes. Na primeira realizou-se uma comparação em termos de ângulo de atrito secante médio englobando as quatro novas configurações de ensaio de rampa e somente interfaces Ar15 x Ar15. Todos os ensaios utilizados apresentam espessura de solo de 10cm, mesma densidade relativa e submetidos a uma tensão confinante de 1,6kPa. Os resultados são apresentados na Tabela 34 e Figura 194.

Observa-se para as interfaces solo-solo que o aumento da área de contato de 0,25 para 0,50m² acarreta uma diminuição do ângulo de atrito secante de 1,5°. Entretanto, o aumento da área de 0,5 para 1,0m², ou a mudança da forma da área de contato, não influencia significativamente o valor do ângulo de atrito secante (Figura 194).

Os resultados dos ensaios areia-areia para a configuração RP25Q-10 não respeitam o limite de distribuição de tensões, pois apresentam uma relação comprimento da caixa vs altura igual a 5. O não respeito desta condição acarreta no travamento da caixa de ensaio por excesso de concentração de tensões na parte frontal e o conseqüente aumento do valor do ângulo de rampa.

Para as outras configurações, os valores de ângulo de atrito secante foram parecidos. Esse resultado era esperado, pois estes conjuntos de ensaios não sofrem influência das condições de contorno do equipamento, tais como distribuição de tensões e limite de utilização do sistema de confinamento.

É importante ressaltar que todos estes ensaios respeitaram os limites impostos quanto à relação diâmetro da partícula / espessura da camada de solo e a relação abertura da malha da geogrelha / dimensões internas da caixa de ensaio apresentadas no Capítulo 3.

Tabela 34 - Ensaio de rampa para avaliação da influência das dimensões do equipamento nos resultados

Interface	Configuração	Ensaio	α ($^{\circ}$)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} ($^{\circ}$)	Média ($^{\circ}$)
				σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ		
Ar15xAr15	RP25Q-10	1	23	1,47	0,95	0,65	32,9	33,1
		2	23	1,47	0,95	0,65	32,9	
		3	23	1,47	0,95	0,65	32,9	
		4	23	1,47	0,95	0,65	32,9	
		5	24	1,45	0,99	0,68	34,1	
	RP50Q-10	1	25	1,47	0,92	0,62	32,0	31,6
		2	25	1,47	0,92	0,62	32,0	
		3	24	1,48	0,88	0,60	30,8	
	RP50R-10	1	24	1,46	0,89	0,61	31,2	31,2
	RP100Q-10	1	26	1,45	0,87	0,60	30,9	31,3
2		27	1,44	0,90	0,63	32,0		
3		26	1,45	0,87	0,60	30,9		

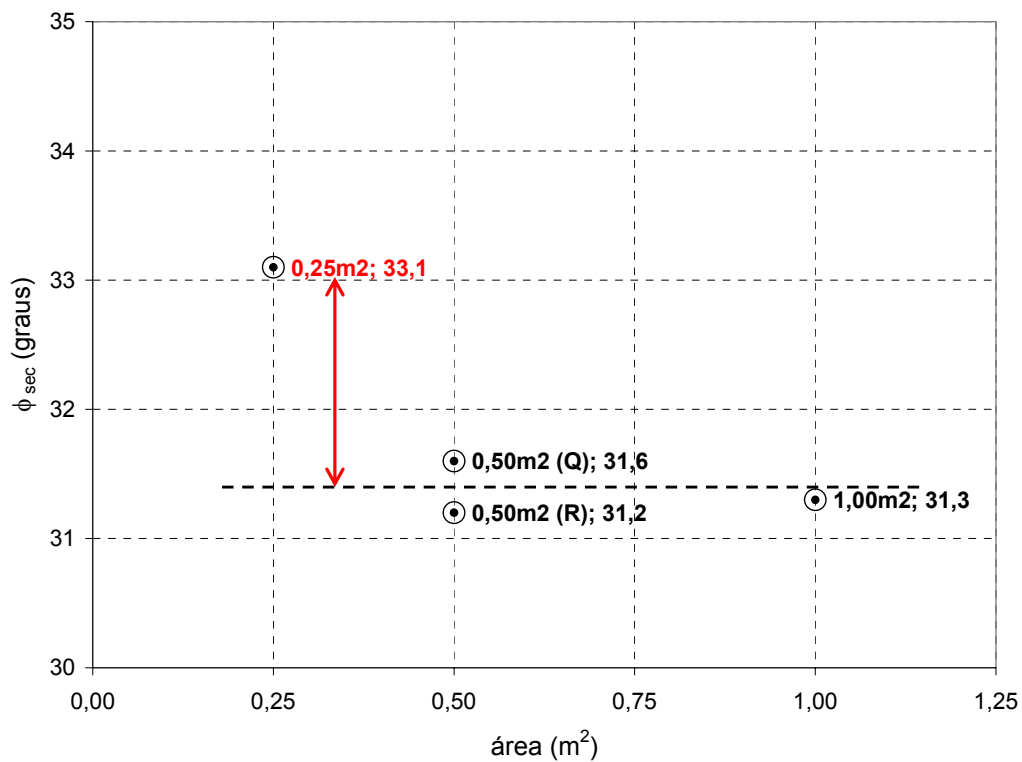


Figura 194 - Comparação dos resultados de ensaios de rampa, em termos de ângulo de atrito secante, para interfaces solo-solo.

A segunda parte da avaliação da influência da forma e dimensões das caixas consistiu em comparar as envoltórias de resistência obtidas para interfaces solo-solo e solo-geossintético empregando as configurações de ensaio RP25Q-10 ($0,25\text{m}^2$) e RP50R-10 ($0,50\text{m}^2$). Neste caso foi avaliado, somente, o efeito de aumento da área de contato (Figuras 195 a 197). Os ensaios utilizados nesta comparação seguiram as recomendações do Item 6.4.1 no que diz respeito à relação comprimento / altura das caixas de ensaio.

Independente da interface observa-se que a diminuição da área de contato pouco altera o valor do ângulo de atrito de interface. A variação foi de $0,2^\circ$ para a interface areia-areia, $0,3^\circ$ para a interface areia-geogrelha e 0° para a areia-geomembrana. Conclui-se então que a redução da área de contato não altera o valor do ângulo de interface. Desta forma, a utilização da configuração RP25Q-10 pode ser empregada sem restrições nos demais estudos desta pesquisa.

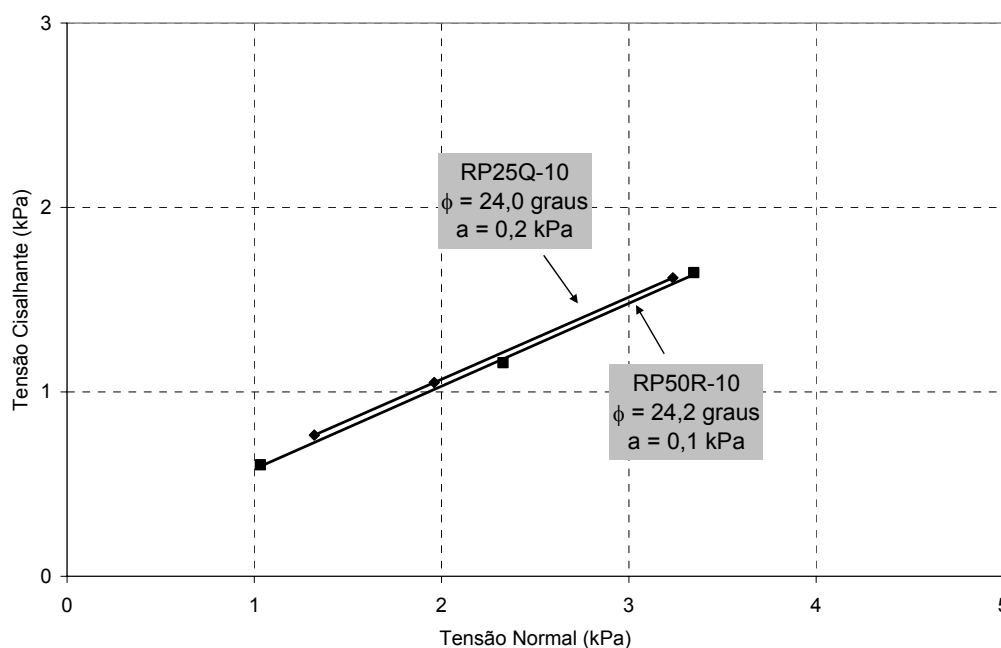


Figura 195 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência.

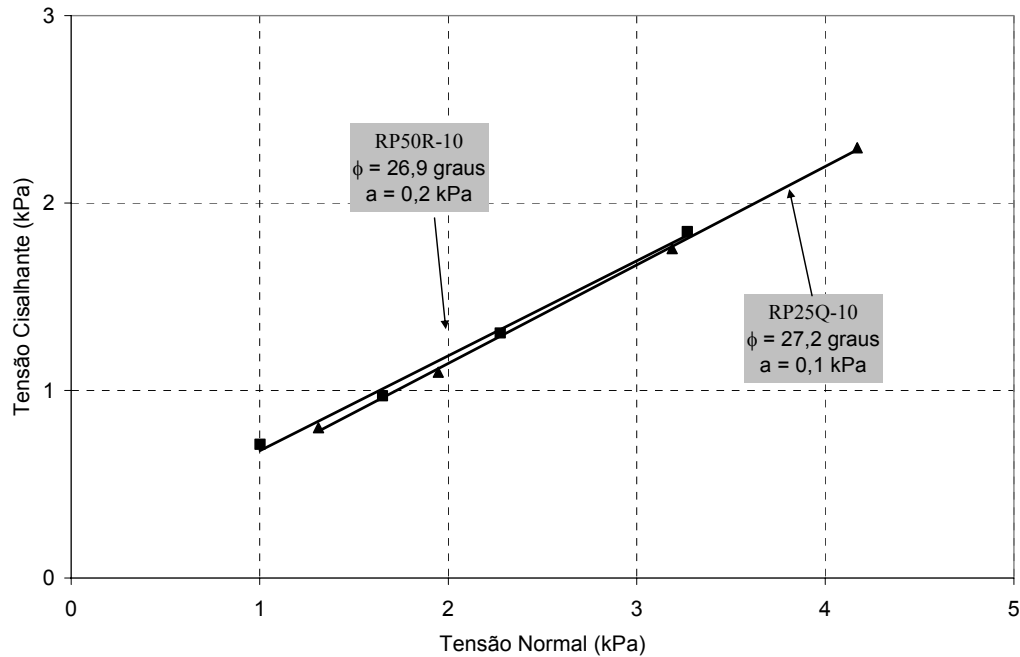


Figura 196 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência.

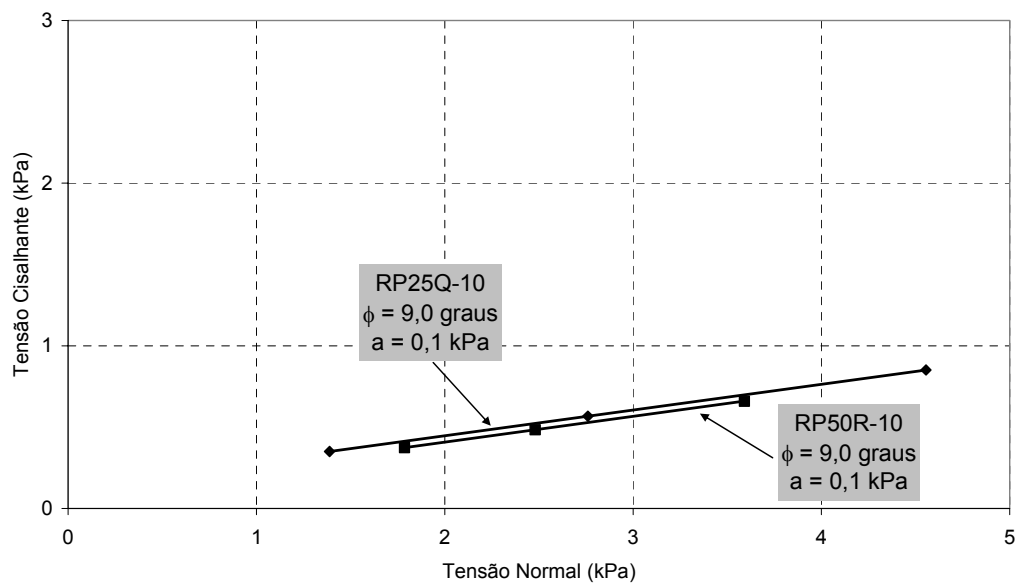


Figura 197 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana em termos de envoltória de resistência.

Ensaio de Cisalhamento Direto

De maneira análoga ao estudo feito para o ensaio de rampa, empregaram-se duas configurações de ensaio de cisalhamento para analisar o efeito da redução da área de contato nos parâmetros obtidos (Figuras 198 a 202).

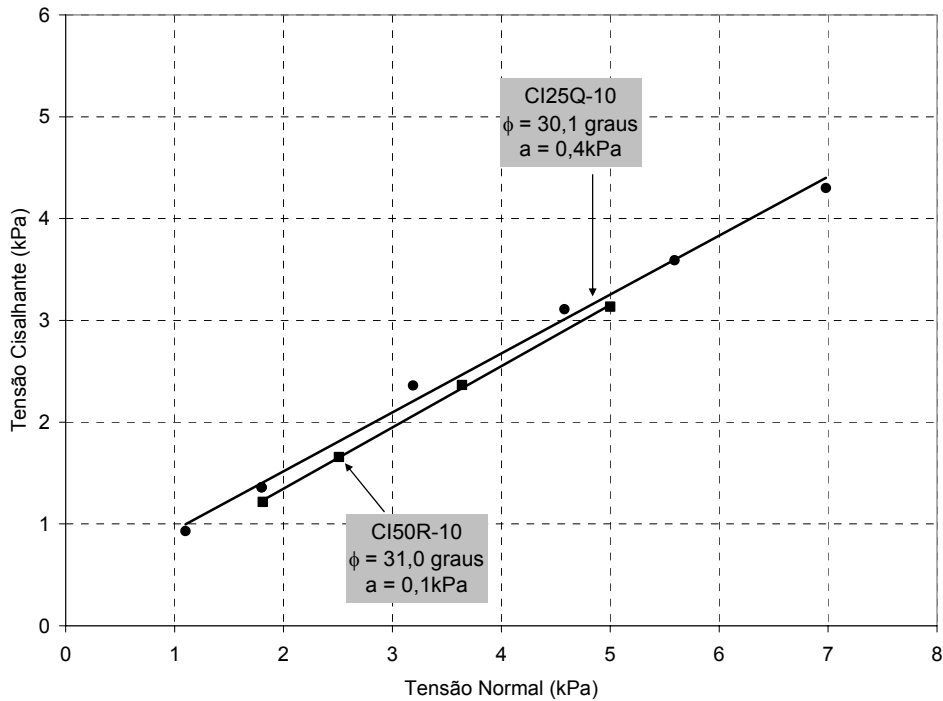


Figura 198 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência.

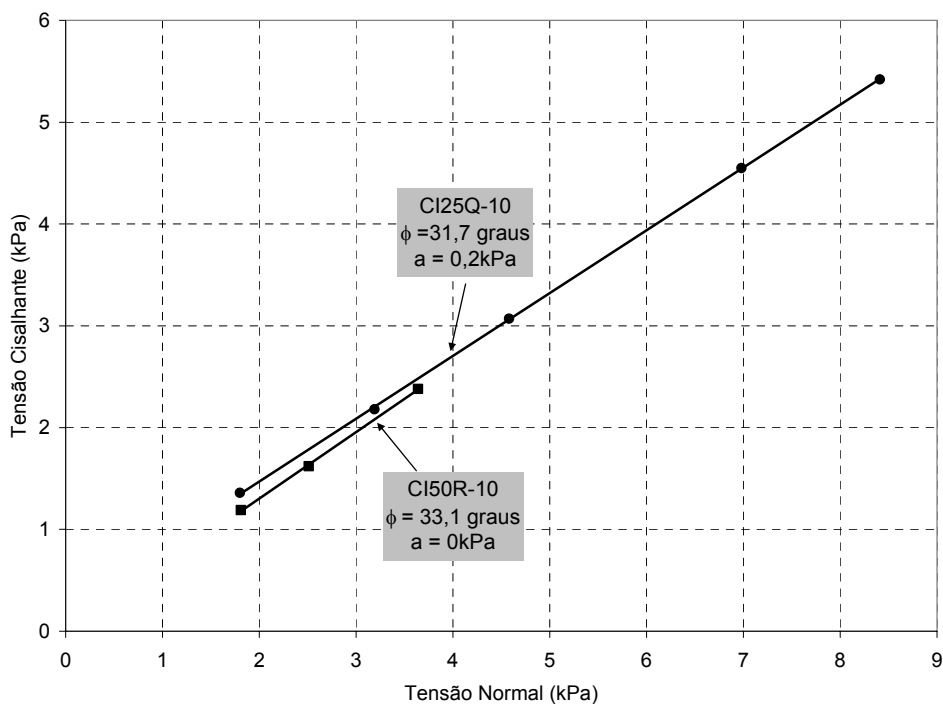


Figura 199 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência.

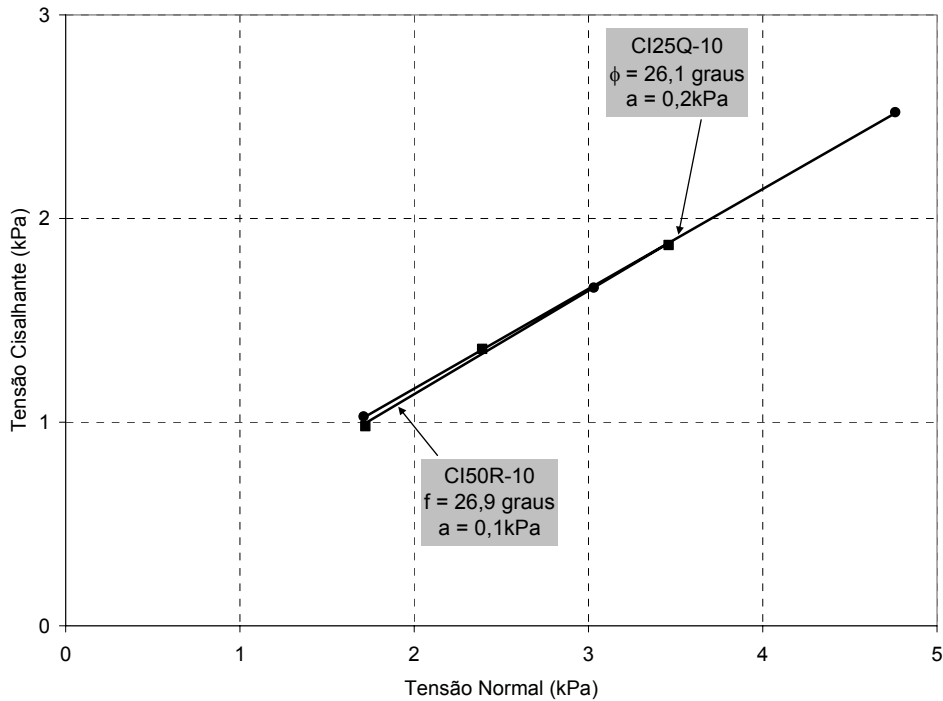


Figura 200 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-solo em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 18°.

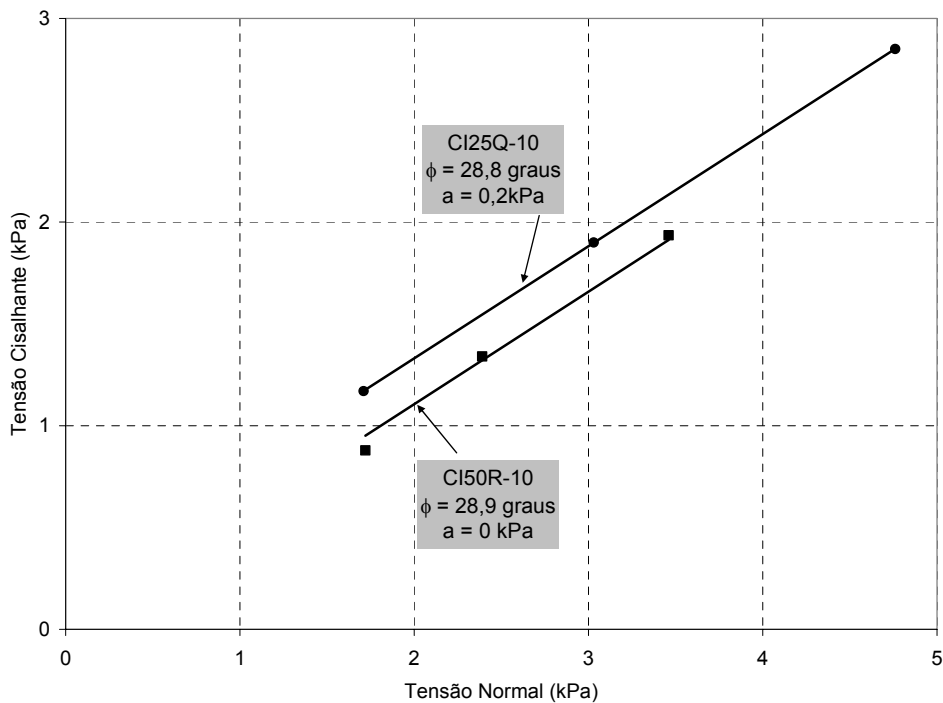


Figura 201 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geogrelha em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 18°.

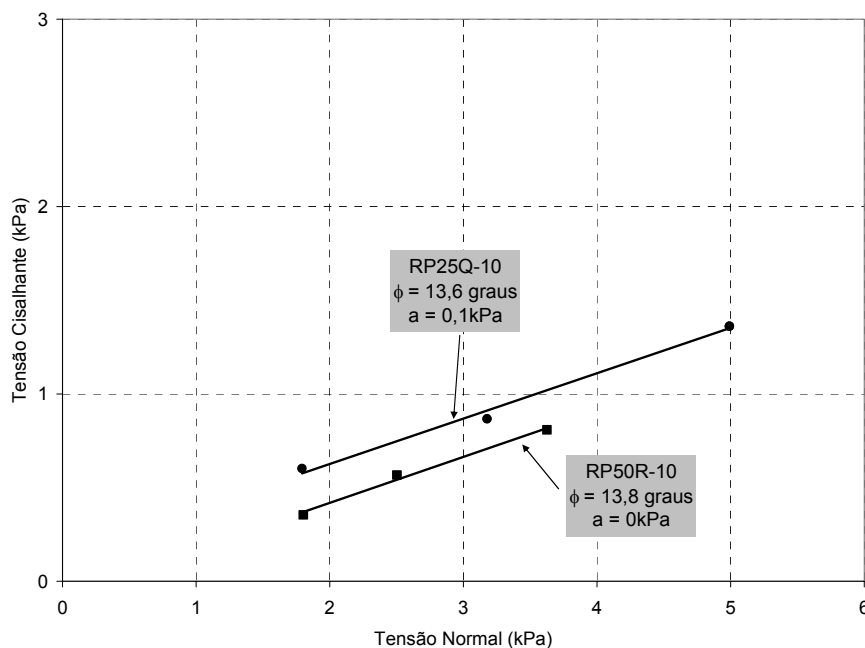


Figura 202 - Avaliação do aumento da área de contato em ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces solo-geomembrana em termos de envoltória de resistência para plataforma de ensaios inclinada de 4,5°.

A Tabela 35 apresenta um resumo dos resultados destes ensaios. Apesar das diferenças entre os valores dos parâmetros obtidos pelas duas configurações ser um pouco maior a conclusão é a mesma dos ensaios de rampa. A utilização da configuração de ensaio com caixa menor não compromete os resultados. Desta forma, a utilização da configuração CI25Q-10 pode ser empregada sem restrições nos demais estudos da pesquisa.

Tabela 35 - Resumo dos resultados para os ensaios de cisalhamento

Inclinação (°)	Configuração	Interface					
		Ar15 x Ar15		Ar15 x GG35		Ar15 x GMPL	
		ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	a (kPa)	ϕ (°)	a (kPa)
0	CI25Q-10	30,1	0,4	31,7	0,2	~	~
	CI50R-10	31,0	0,1	33,1	0,0	~	~
4,5	CI25Q-10	~	~	~	~	13,6	0,1
	CI50R-10	~	~	~	~	13,8	0,0
18	CI25Q-10	26,1	0,2	28,8	0,2	~	~
	CI50R-10	26,9	0,1	28,9	0,0	~	~

6.5. Influência da Metodologia de Ensaio

Para avaliar a influência da metodologia de ensaio foram comparadas as envoltórias de ruptura de ensaios de rampa para as interfaces areia-areia, areia-geogrelha e areia-geomembrana com densidade relativa de 15% (Tabela 36 e Figuras 203 a 205).

Conforme mencionado anteriormente, o equipamento possibilita a realização de ensaios de rampa com faces normais ou inclinadas (Figura 206). A vantagem da utilização das faces inclinadas é ter, no momento da ruptura, uma melhor distribuição da tensão normal.

Tabela 36 - Resultados dos ensaios de rampa com faces normais e inclinadas para as interfaces solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana

Interface	Metodologia	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
					σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ	
Ar15xAr15	V (0°)	1,4	9,8	20	1,32	0,77	0,58	30,1
		2,1	6,5	21	1,96	1,05	0,54	28,2
		3,5	3,0	22	3,23	1,62	0,50	26,6
	I (30°)	2,7	10,5	22	2,56	1,39	0,54	28,5
		4,3	20,0	23	3,99	2,06	0,52	27,4
Ar15xGG35	V (0°)	1,4	3,3	21	1,31	0,80	0,61	31,4
		2,1	4,5	22	1,95	1,10	0,56	29,4
		2,8	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
		3,5	6,8	24	3,19	1,76	0,55	28,9
		4,6	4,3	24	4,20	2,21	0,53	27,7
	I (30°)	2,7	13,5	21	2,53	1,33	0,53	27,7
		3,5	8,8	21	3,28	1,61	0,49	26,2
		4,3	9,8	22	3,99	1,98	0,50	26,4
Ar15xGMPL	V (0°)	1,4	2,3	9	1,39	0,35	0,25	14,2
		2,8	0,8	9	2,76	0,57	0,21	11,6
		4,6	0,3	9	4,56	0,85	0,19	10,6
	I (30°)	2,7	0,0	6	2,76	0,38	0,14	7,92
		4,3	0,3	6	4,33	0,55	0,13	7,22
		5,1	0,3	6	5,12	0,63	0,12	7,03

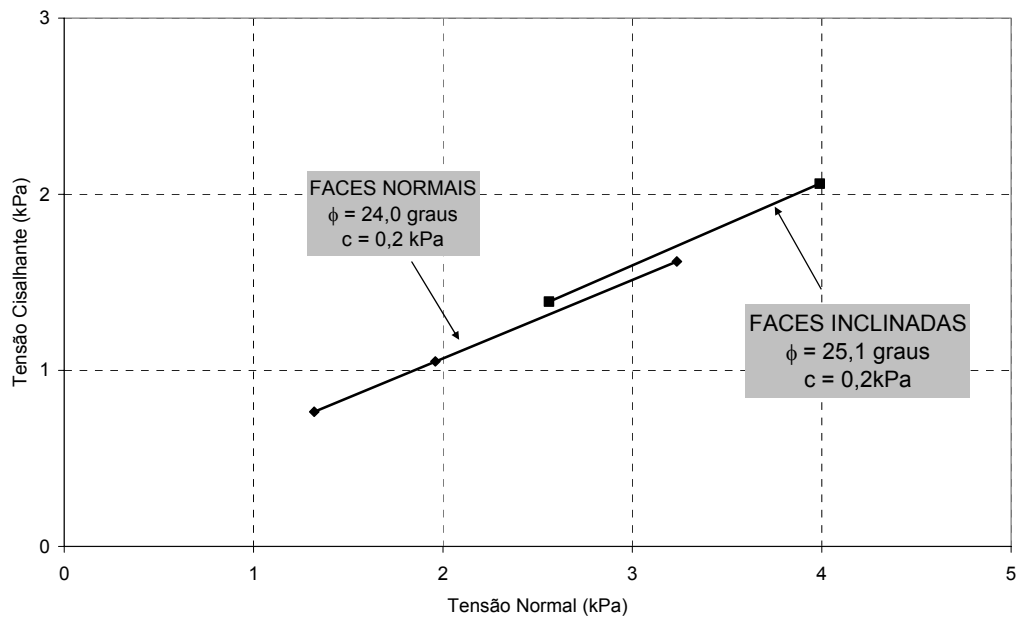


Figura 203 - Envoltórias de resistência solo-solo obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.

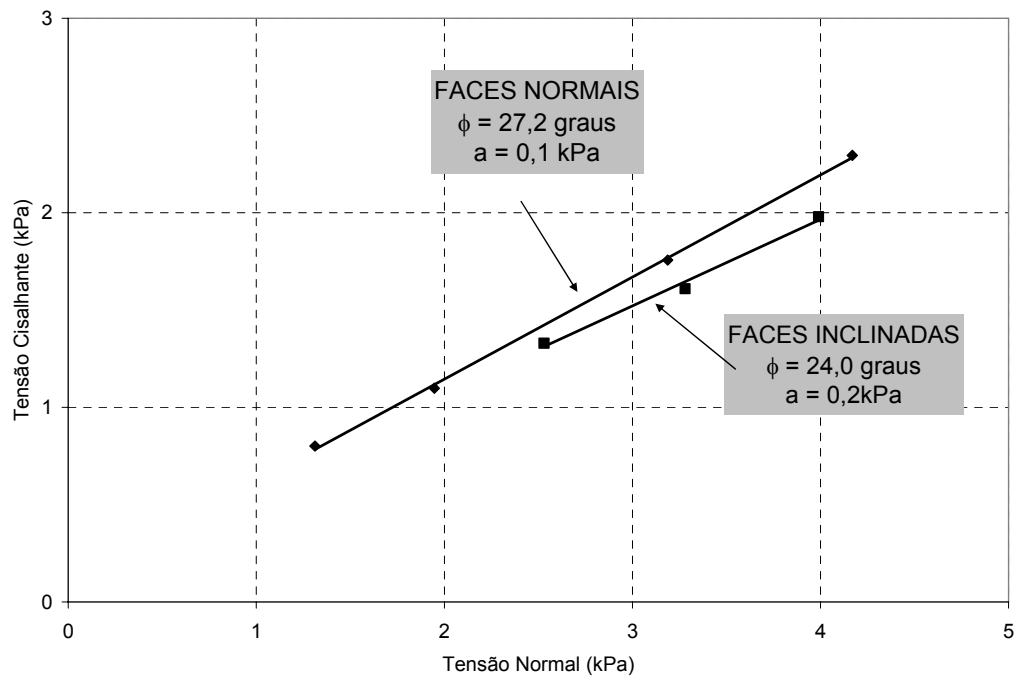


Figura 204 - Envoltórias de resistência solo-geogrelha obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.

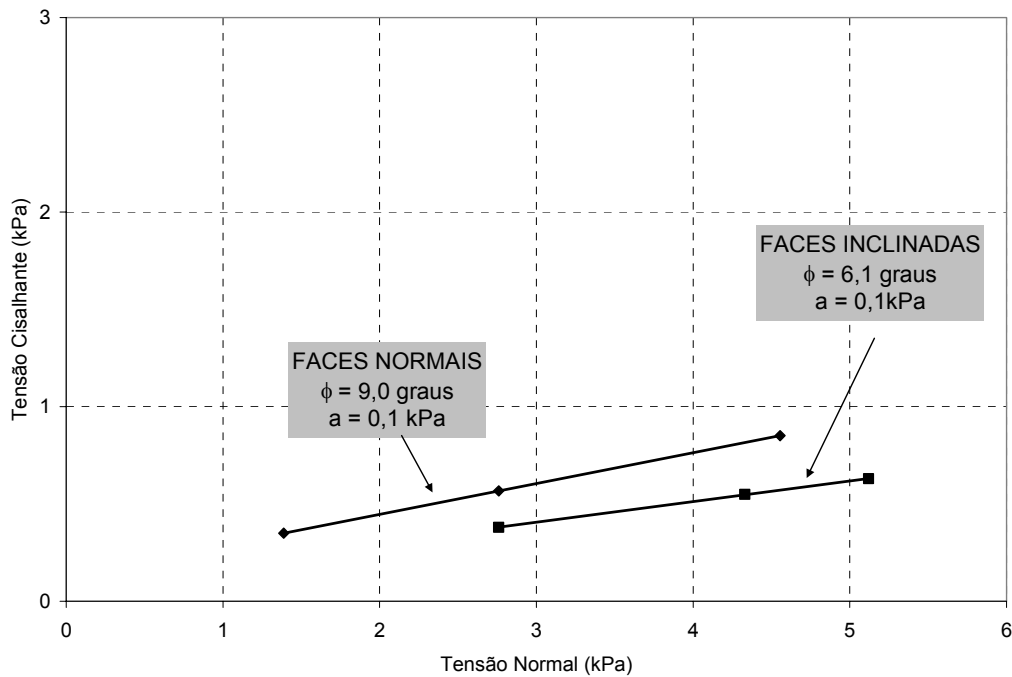


Figura 205 - Envoltórias de resistência solo-geomembrana obtidas com o equipamento com faces normais e com faces inclinadas.

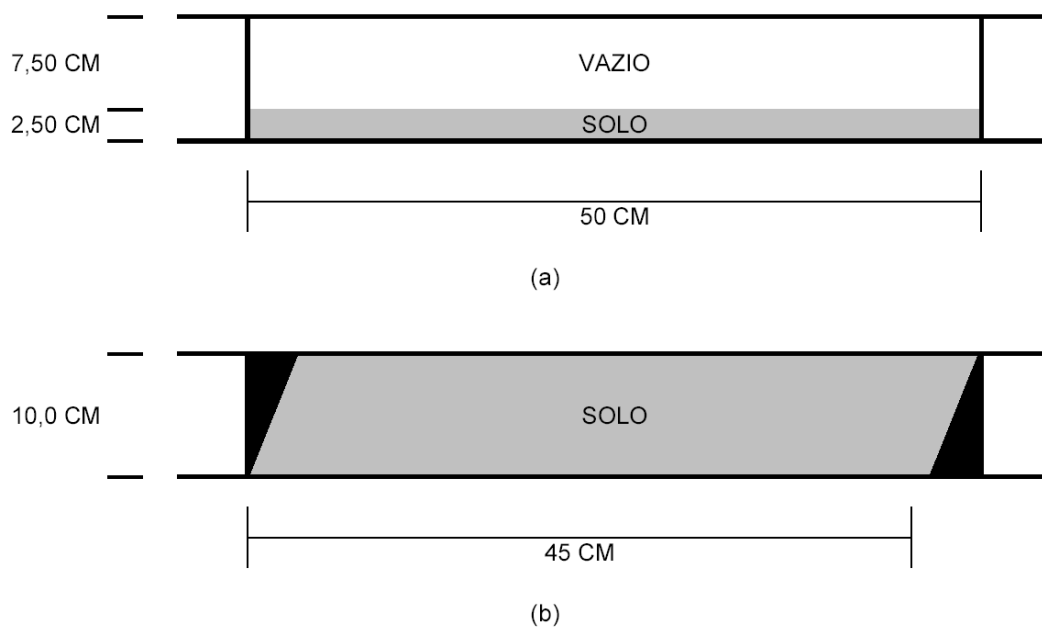


Figura 206 - Esquema interno da caixa superior de ensaio da configuração RP25Q-10 utilizado na avaliação da metodologia de ensaio com faces: (a) normais e (b) inclinadas.

A comparação entre os resultados obtidos pelas duas metodologias não é boa. A diferença entre os parâmetros obtidos é considerável, sendo em média, 3° no ângulo de atrito de interface. A justificativa para este comportamento pode ser associada a dois fatores:

(i) *distribuição da tensão normal ao longo da interface*: as duas metodologias têm comportamentos completamente diferentes no que concerne a distribuição de tensões ao longo da interface. No ensaio com faces convencionais a distribuição de tensões deixa de ser uniformemente distribuída e passa a ser trapezoidal à medida a plataforma de ensaios é basculada. Isso se torna crítico na condição de ruptura. Na metodologia com face inclinada a distribuição de tensões inicialmente não uniforme atinge uma condição ótima de distribuição uniforme com uma inclinação de 30°. Desta forma, para interfaces mais resistentes, a utilização de faces inclinadas pode ser interessante. Entretanto, para as interfaces menos resistentes (Ar15 x GMPL), ela é extremamente desfavorável, ocasionando rupturas que não condizem com a realidade. A solução para melhorar o desempenho desta metodologia seria utilizar faces com inclinações menores. Também é interessante ressaltar que a utilização de faces inclinadas pode ser a mais indicada para os ensaios de cisalhamento direto inclinado, pois são realizados em uma inclinação pré-determinada.

(ii) *compactação dos corpos de prova*: este é outro fator que pode contribuir para um resultado ruim. A compactação é extremamente complicada atrás da face inclinada frontal devido à falta de acesso (Figura 207).



Figura 207 - Face inclinada frontal.

6.6. Desgaste e Dano na Geomembrana

O estudo do desgaste e lesão (dobra no corpo de prova) em geomembranas foi feito em uma série de corpos de prova da geomembrana Polimanta com o intuito de se avaliar a possibilidade de reaproveitamento de um mesmo corpo de prova para mais de um ensaio.

O estudo consistiu em avaliar estas duas condições em duas configurações de ensaio de rampa e depois para uma das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado.

A Figura 208 apresenta as envoltórias obtidas para as condições de uso excessivo da geomembrana empregando-se as configurações RP25Q-10 e RP50R-10 e de dano simulado (vinco) empregando-se, somente, a configuração RP25Q-10.

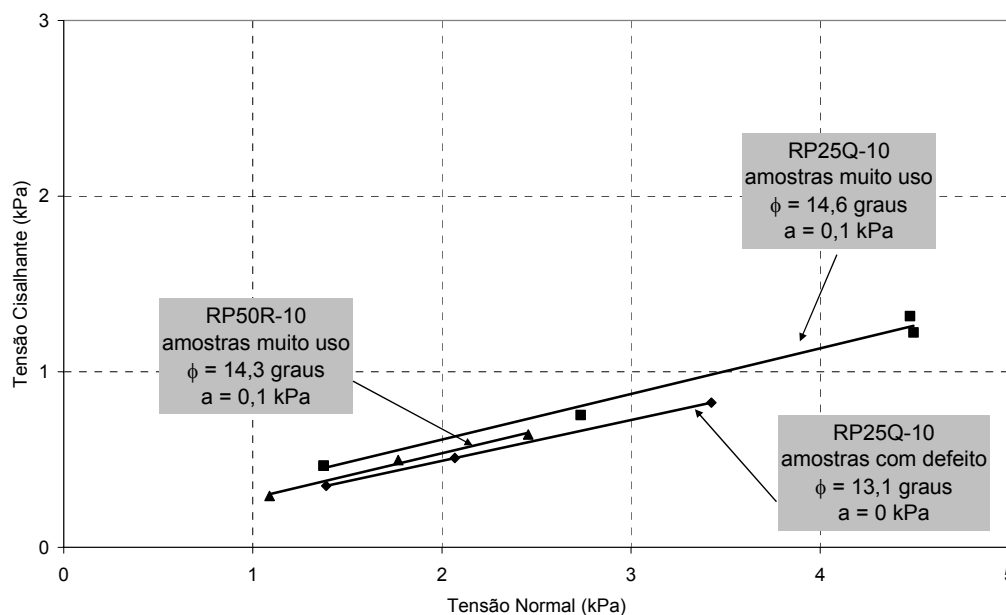


Figura 208 - Ensaio de rampa para interfaces solo-geomembrana: amostras com defeito e muito uso.

Observa-se que os parâmetros obtidos a partir das duas configurações de rampa para as amostras desgastadas são praticamente os mesmos, 14,3° (RP50R-10) e 14,6° (RP25Q-10). Já o efeito do dano resultou em um ângulo de atrito de interface igual a 13,1°.

Avaliou-se também, através de envoltórias de resistência, a influência de se utilizar o mesmo corpo de prova de geomembrana por um número determinado de vezes (uso controlado). Os resultados são comparados com os obtidos com

amostras novas (Figura 209). As amostras de uso controlado foram reutilizadas por somente duas vezes, ou seja, o suficiente para se obter uma envoltória de três pontos.

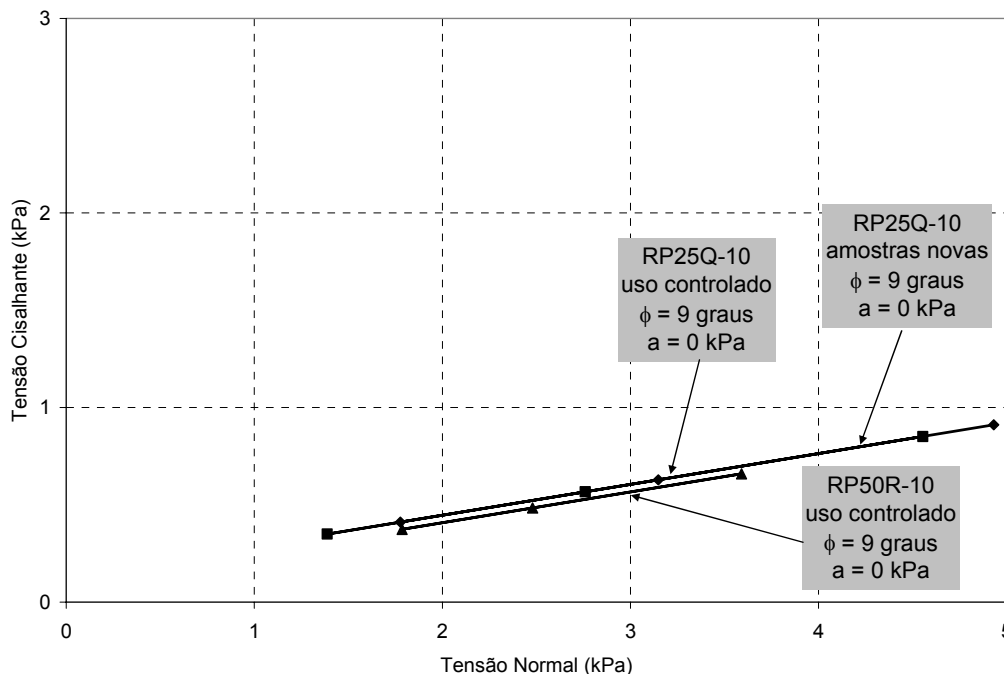


Figura 209 - Ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana: amostras com uso controlado e novas.

Observa-se que independente da configuração de ensaio e da condição da amostra, uso controlado ou nova, os parâmetros de interface foram sempre os mesmos e iguais 9° de ângulo de atrito e zero de adesão. Portanto, estes resultados confirmam a possibilidade de uso da mesma amostra por três vezes sem que isso comprometa os valores dos parâmetros de resistência de interface para este o geossintético (geomembrana) utilizado nesta pesquisa..

A Figura 210 apresenta uma comparação entre os resultados desta análise, em termos de envoltórias de resistência, considerando amostras com defeito, amostras com muito uso e amostras com uso controlado.

Percebe-se que há uma variação considerável do ângulo de atrito de interface quando se altera as condições da superfície da geomembrana. O defeito na amostra e o uso em excesso provocam um aumento do ângulo de atrito de interface de $4,1^\circ$ e $5,6^\circ$, respectivamente. O vinco na amostra de geomembrana com defeito e o excesso de uso introduzem uma rugosidade artificial na superfície

da geomembrana lisa, transformando-a em geomembrana rugosa. Conforme reportado no Capítulo 3, a resistência da interface da geomembrana rugosa é maior do que uma geomembrana lisa. Isso ocorre devido ao imbricamento dos grãos de solo com as rugosidades (Izgin e Wasti, 1998).

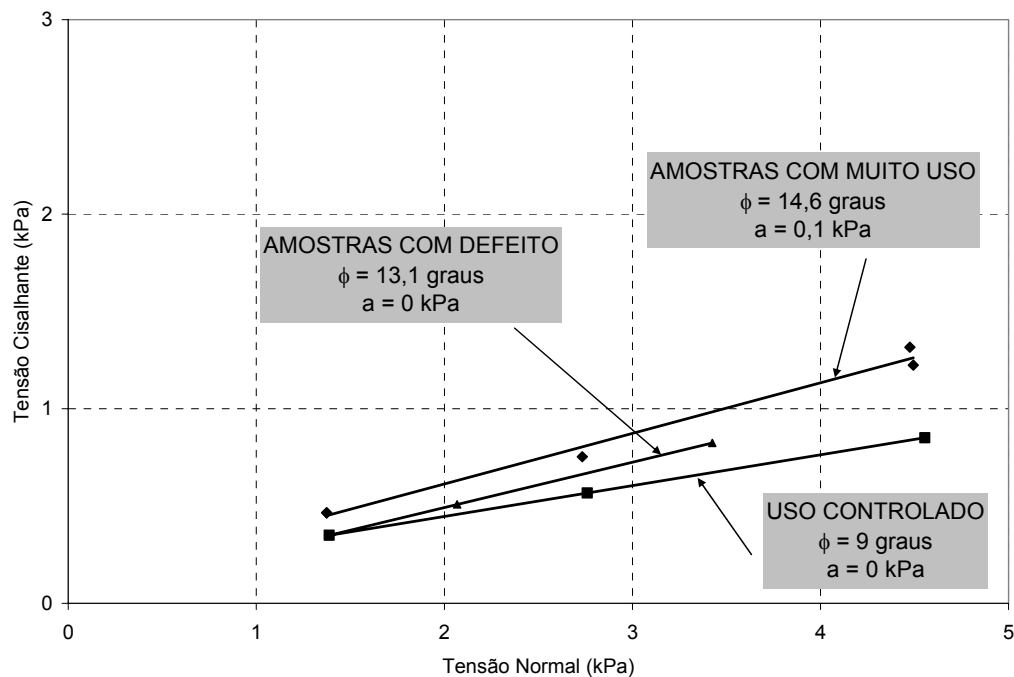


Figura 210 - Comparação entre os resultados dos ensaios de rampa para interfaces solo-geomembrana.

Este mesmo estudo foi feito para os ensaios de cisalhamento direto convencional e cisalhamento direto inclinado. Observa-se que, independente do tipo de ensaio, os resultados são semelhantes aos do ensaio de rampa, ou seja, uma diferença considerável de comportamento entre as amostras de geomembrana com condições de uso excessivo e dano provocado em relação ao de amostras novas e de uso controlado.

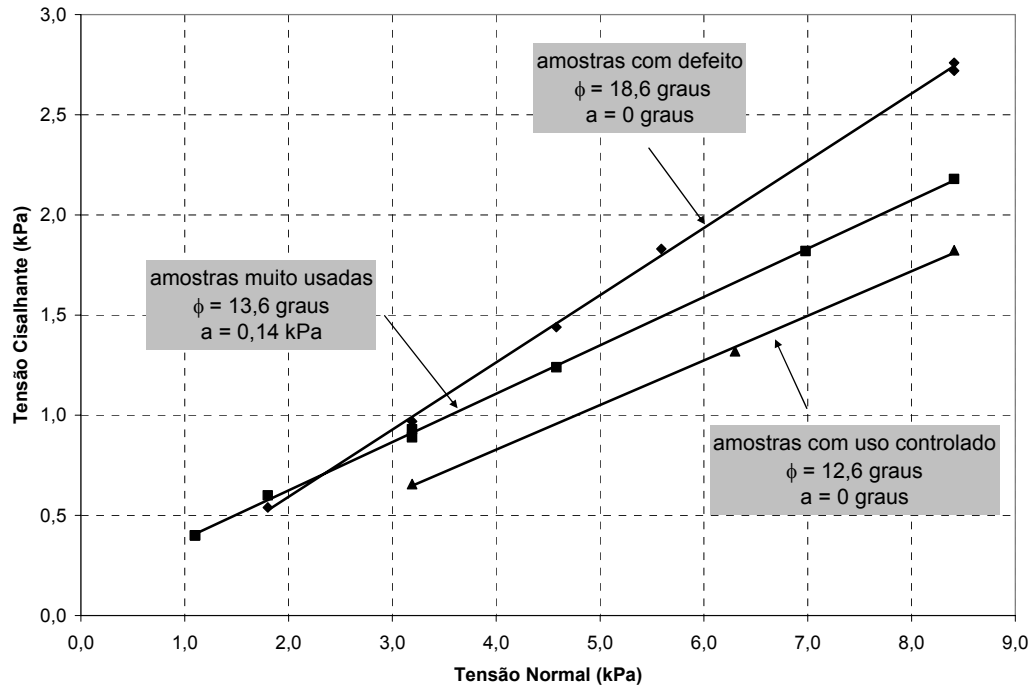


Figura 211 - Ensaio de cisalhamento direto para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.

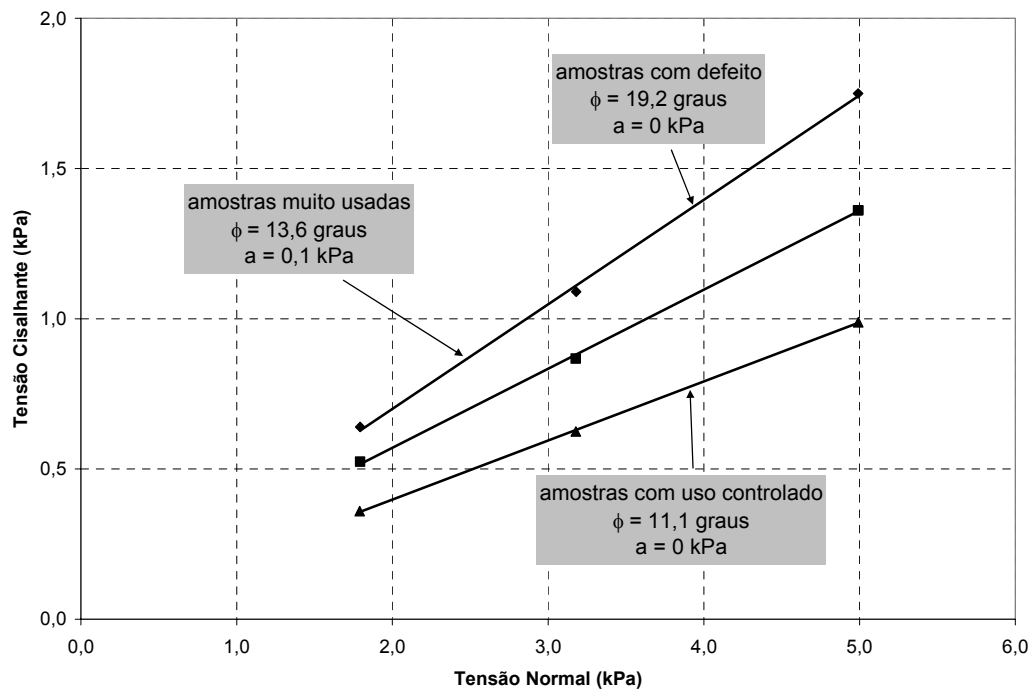


Figura 212 - Ensaio de cisalhamento inclinado (plataforma inclinada de 4,5 graus) para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.

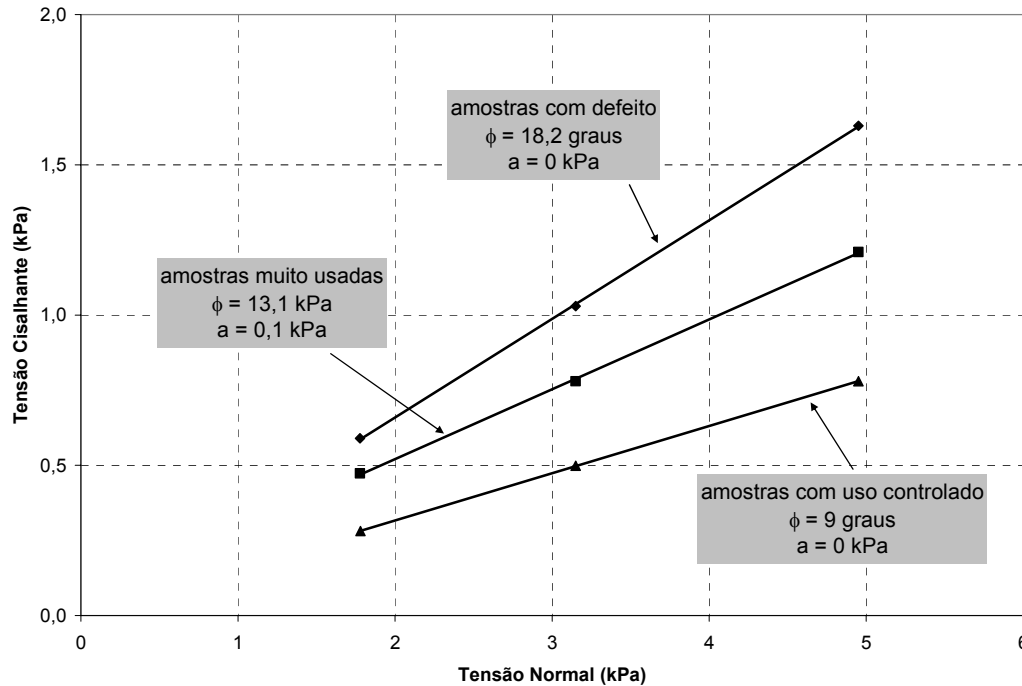


Figura 213 - Ensaio de cisalhamento inclinado (plataforma inclinada de 9°) para interfaces solo-geomembrana na configuração CI25Q-10.

6.7. Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma série de análises e verificações iniciais que são utilizadas nos demais capítulos de resultados subsequentes.

As análises de todos os tipos de ensaios foram realizadas adotando-se um critério de ruptura unificado que levou em consideração as observações de Pitanga *et al.* (2007) e da Norma ISO 12957-2.

Também foi feita a avaliação da acurácia do equipamento empregando-se um conjunto de ensaios que apresentavam características idênticas. Concluiu-se que, apesar da rusticidade, o equipamento apresenta uma precisão razoável e dentro de limites toleráveis.

A influência das dimensões do equipamento foi avaliada por meio da variação da forma e dimensão da área de contato e variação da relação comprimento / altura da caixa de ensaio.

As conclusões indicam que, dentro dos limites de utilização estabelecidos, a variação da forma e da área de contato pouco afeta os resultados obtidos. Entretanto, os resultados são fortemente influenciados pela variação da relação

espessura / comprimento da caixa de ensaio, a qual interfere na distribuição de tensões ao longo da interface. Um estudo experimental comprovou as recomendações feitas por Melo *et al.* (2003) e Palmeira *et al.* (2002). A formulação analítica sugerida por estes autores foi empregada nas análises de todos os conjuntos de caixas e de todos os ensaios.

Também foi estudada a influência da metodologia de ensaio nos resultados de rampa. Ensaios com caixas de faces inclinadas não forneceram bons resultados quando comparados com os ensaios de faces verticais.

Por último, foi analisada a influência de danos e desgaste excessivo das amostras de geomembrana nos parâmetros de interface obtidos para diferentes ensaios. Concluiu-se que eles são significativamente alterados pelo aumento da rugosidade da interface causado pelos danos e desgaste. Entretanto, ensaios com o uso controlado das amostras fornecem parâmetros de resistência de interface semelhantes aos das amostras novas.

7. Resultados e Análises: Ensaio de Rampa

7.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os ensaios de rampa realizados nesta tese. Avalia-se a influência da tensão confinante, densidade relativa do solo, granulometria, tipo de solo e tipo de geossintético. Sempre que possível, são feitas comparações com os resultados reportados por Aguiar (2003), Rezende (2005) e Tavares (2008).

As envoltórias de resistência das interfaces foram obtidas através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais distintas. Os ensaios são identificados pelo valor inicial da tensão normal, ou seja, a tensão aplicada pelas placas de aço mais a camada de solo da caixa superior com a plataforma de ensaio na posição horizontal. É importante ressaltar que os valores de tensão normal e cisalhante utilizados para obtenção das envoltórias de resistência são os correspondentes à condição de ruptura, já que existe uma variação destes valores com a inclinação da plataforma de ensaios.

A parcela da tensão confinante referente à camada de solo depende do tipo de material, espessura da camada de solo e densidade relativa. Desta forma, em todas as análises são especificadas as tensões confinantes consideradas.

Os ensaios são identificados por meio da combinação das seguintes siglas: Ar para areia; B0 para brita utilizada por Tavares (2008); GMPL para geomembrana Polimanta; GMCP para geomembrana Cipageo; GG35 para geogrelha Fortrac 35; 15, 45 e 90 para densidades relativas da areia respectivamente iguais a 15%, 45% e 90%. Por exemplo, a sigla AR15xGG35 corresponde ao ensaio de interface areia-geogrelha com densidade relativa de 15%.

7.2. Influência da Tensão Confinante

A Tabela 37 apresenta os resultados mais representativos em todas as interfaces ensaiadas para, no mínimo, três tensões confinantes diferentes. A interface areia vs geomembrana Polimanta (GMPL) foi ensaiada para três densidades relativas diferentes com o objetivo de completar o banco de dados existente e possibilitar comparações.

Tabela 37 - Influência da tensão confinante nos ângulos de rampa na ruptura

Interface	Dr (%)	α (graus)					$\Delta\alpha$	
		$\sigma_n=1,4$ kPa	$\sigma_n=2,1$ kPa	$\sigma_n=2,8$ kPa	$\sigma_n=3,5$ kPa	$\sigma_n=4,6$ kPa	(°)	(%)
Ar x Ar	15	20	21	~	22	~	+2	10,0
Ar x GG35	15	21	22	24	24	24	+3	14,3
Ar x GMPL	15	9	~	9	~	9	0	0,0
	45	9	9	9	~	~	0	0,0
	90	9	9	9	~	~	0	0,0
Ar x GMCP	15	15	16	17	~	~	+2	13,3

De acordo com a Tabela 37, pode-se observar que o aumento da tensão confinante acarretou em comportamentos diferentes no que concerne ao ângulo de rampa de ruptura para as diferentes interfaces ensaiadas. Percebe-se que a interface areia-geogrelha (Ar x GG35) sofre a maior influência da tensão confinante, com um aumento do ângulo de rampa de 3°, correspondendo a um aumento de 14,3%. Já os ângulos de rampa de ruptura das interfaces areia-areia (Ar x Ar) e areia-geomembrana Cipageo (Ar x GMCP) têm um aumento de 2°, equivalente a um aumento de 10 e 13,3%, respectivamente.

Nota-se ainda que o comportamento da interface areia-geomembrana Polimanta (Ar x GMPL) é independente da tensão confinante e densidade relativa, pois manteve-se constante e igual a 9°. Este comportamento pode ser explicado pela estrutura da geomembrana que apresenta uma face lisa e polida.

7.3. Influência da Densidade Relativa

7.3.1. Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios de rampa da interface areia-areia para três valores de densidades relativas ($D_r = 15, 45$ e 90%) são resumidos na Tabela 38. Foram incorporados os resultados de Rezende (2005) para completar as análises. Apresenta-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de rampa na ruptura (α_{rup}), tensões normal e cisalhante na ruptura (σ_{rup} e τ_{rup}), relação entre as tensões e ângulo de atrito secante (ϕ_{sec}). A Figura 215 apresenta uma comparação entre os resultados dos ensaios para a tensão de confinamento de 2,1kPa (única tensão de confinamento comum).

Os resultados da Tabela 38 e Figura 214 indicam um comportamento característico de solo arenoso neste tipo de ensaio, onde a ruptura é atingida com valores reduzidos de deslocamento, para as três densidades. Os resultados também indicam que o aumento da densidade relativa acarreta em uma redução dos valores de deslocamentos máximos e um acréscimo do ângulo de rampa, para uma mesma tensão confinante, no caso 2,1kPa.

Tabela 38 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-areia e $D_r = 15, 45$ e 90% .

Dr (%)	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
15	1,4	9,8	20	1,32	0,77	0,58	30,1
	2,1	6,5	21	1,96	1,05	0,54	28,2
	3,5	3,0	22	3,23	1,62	0,50	26,6
45 (*)	2,1	5,3	29	1,79	1,11	0,62	31,7
	3,2	3,0	28	2,86	1,63	0,57	29,7
	5,0	3,5	28	4,44	2,47	0,56	29,1
90 (*)	2,1	2,3	34	1,73	1,30	0,75	36,9
	3,2	1,8	33	2,75	1,91	0,70	34,8
	5,0	1,5	31	4,34	2,73	0,63	32,2

(*) Rezende (2005)

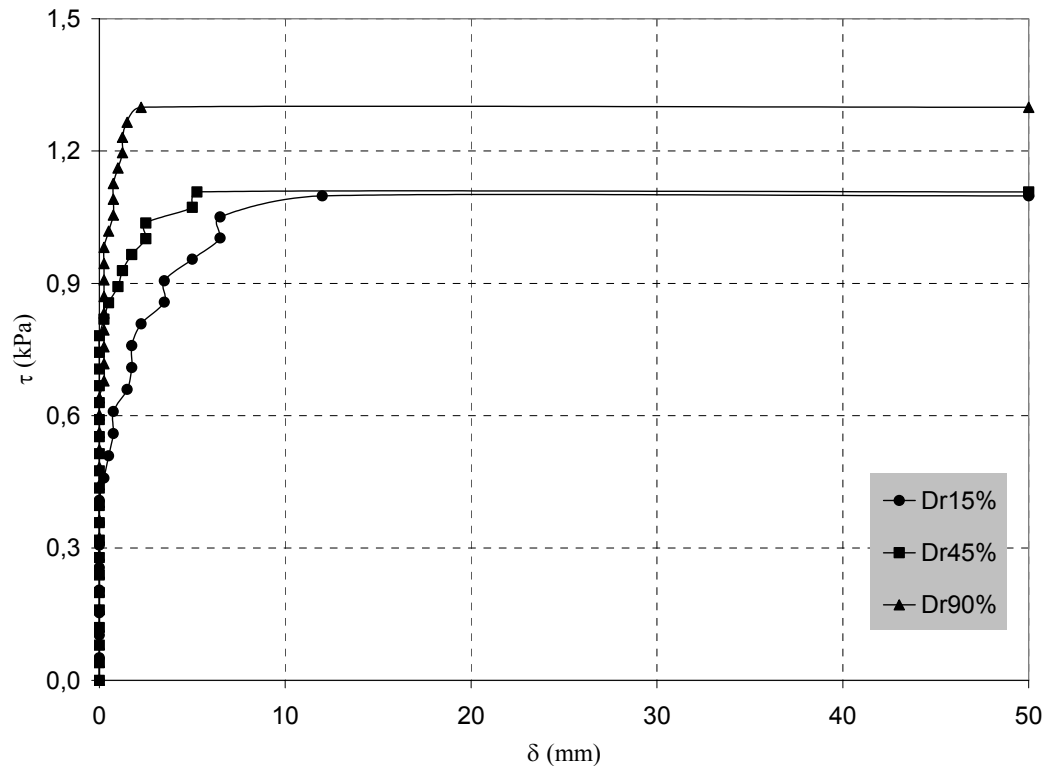


Figura 214 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa, em ensaios de rampa.

A Figura 215 apresenta a variação do ângulo de rampa em função da tensão confinante para as interfaces areia-areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90%. Observa-se que os ângulos de rampa sofrem redução (1 a 3°) com o aumento da tensão confinante para as densidades relativas mais altas. Ao contrário da interface com $Dr=15\%$, que indica aumento do ângulo de rampa (1,5°) com o aumento da tensão confinante.

Observou-se, também, que a diferença entre o ângulo de rampa do material mais denso e do material mais fofo diminuiu com o aumento da tensão confinante (Figura 215). Isso sugere que a envoltória de resistência apresenta uma leve curvatura para o solo mais denso.

A Figura 216 apresenta uma comparação entre as envoltórias de resistência da interface areia-areia para as três densidades relativas, onde os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 24° para a areia na densidade relativa de 15%, coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 27,2° para areia na densidade relativa de 45% e coesão de 0,4kPa e ângulo de atrito de 28,8° para a

densidade relativa de 90%. Assim, constata-se que o aumento da densidade relativa causou um aumento de $4,8^\circ$ no ângulo de atrito e de $0,2\text{kPa}$ na coesão.

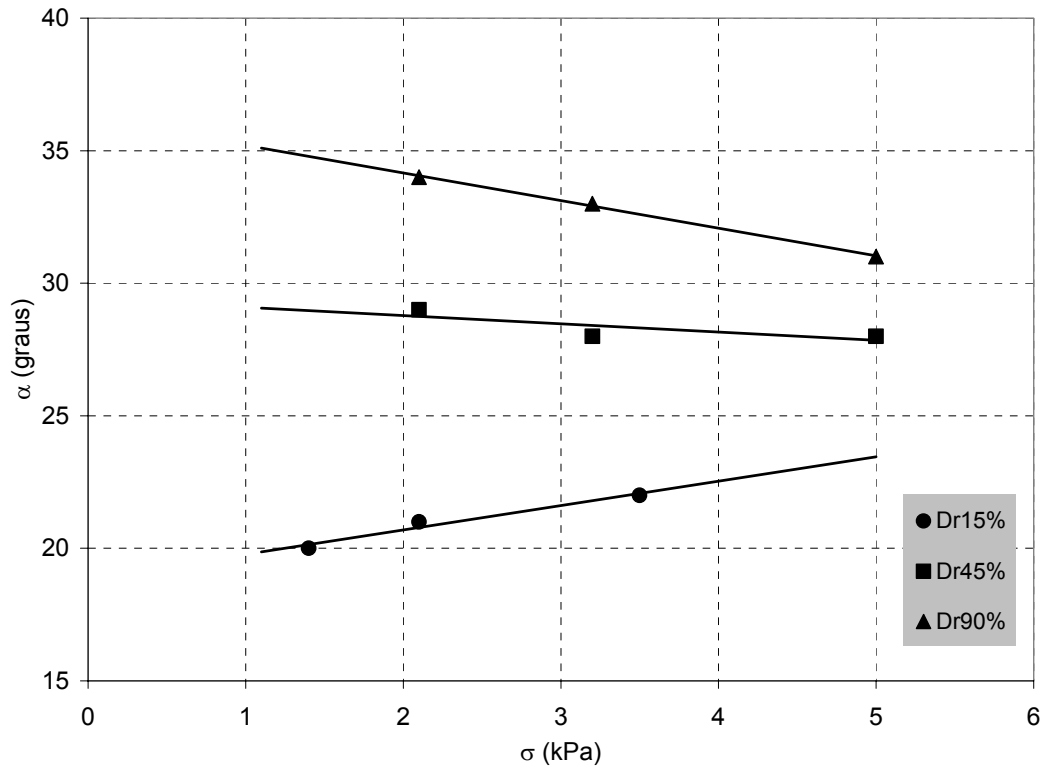


Figura 215 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas da interface areia-areia.

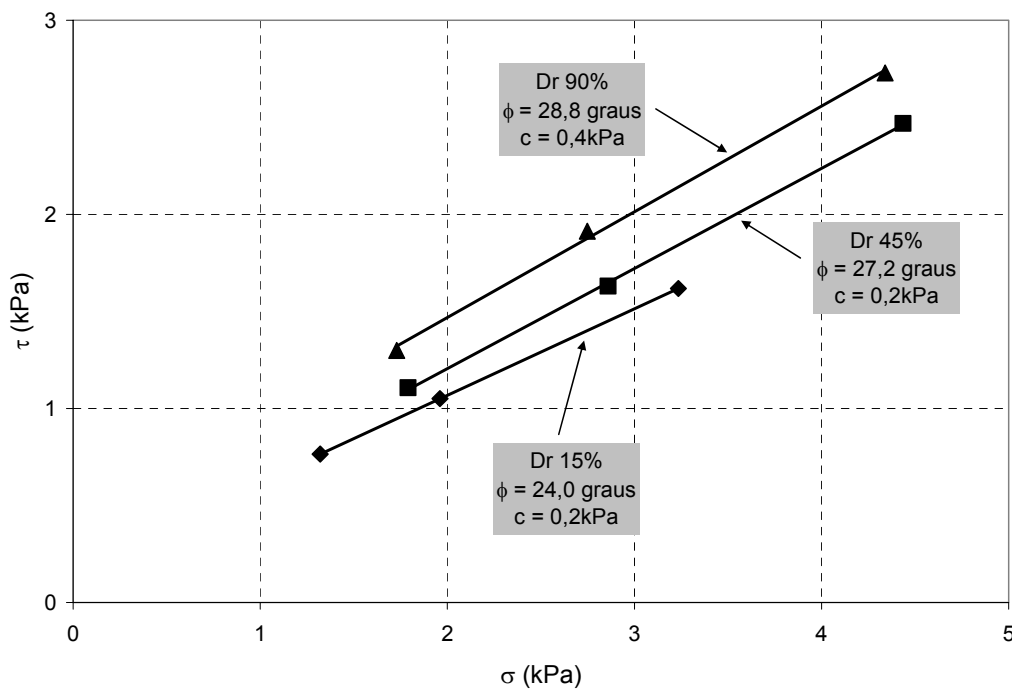


Figura 216 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-areia nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

7.3.2. Interface Solo-Geogrelha

Analogamente ao item anterior, os resultados dos ensaios de rampa da interface areia-geogrelha para as densidades relativas de 15, 45 e 90% são apresentados na Tabela 39 e Figura 217.

Da mesma forma que na interface areia-areia, à medida que se aumenta a densidade relativa do solo, verifica-se uma redução nos valores dos deslocamentos e um acréscimo no ângulo de rampa para a interface solo-geogrelha, para uma mesma tensão confinante de 2,1kPa.

Tabela 39 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geogrelha e $D_r = 15, 45$ e 90%

Dr (%)	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
15	1,4	3,3	21	1,31	0,80	0,61	31,4
	2,1	4,5	22	1,95	1,10	0,56	29,4
	2,8	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
	3,5	6,8	24	3,19	1,76	0,55	28,9
	4,6	4,3	24	4,20	2,21	0,53	27,7
45	1,4	10,5	21	1,32	0,81	0,61	31,4
	2,1	4,8	23	1,94	1,15	0,59	30,6
	2,8	4,8	23	2,58	1,42	0,55	28,8
90 (*)	2,1	0,8	32	1,77	1,23	0,70	34,8
	3,2	1,0	32	2,78	1,86	0,67	33,8
	5,0	2,0	30	4,38	2,65	0,60	31,1

(*) Rezende (2005)

Da Figura 218 observa-se também que, para as densidades relativas de 15 e 45%, o valor do ângulo de rampa aumenta com o aumento da tensão confinante, porém, tendendo à estabilização para as tensões mais altas. A diferença entre o ângulo de rampa do material mais denso e o dos materiais mais fofos diminuiu com o aumento da tensão confinante. Este comportamento também foi observado para interface areia-areia.

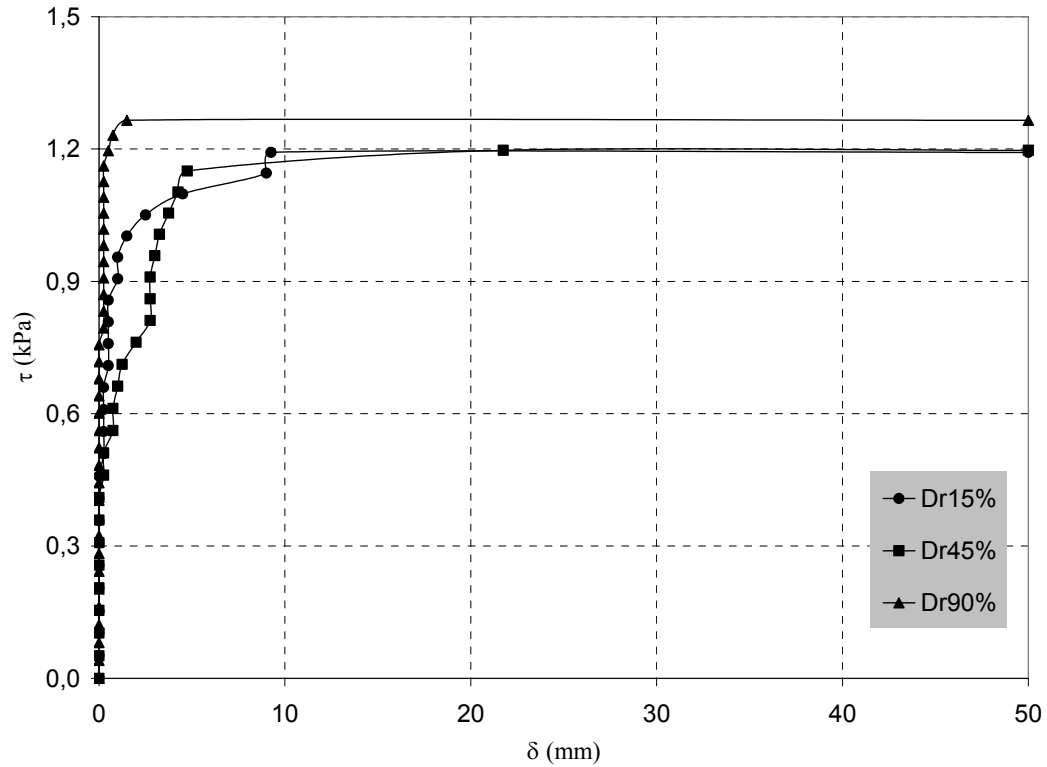


Figura 217 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geogrelha nas densidade relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa em ensaios de rampa.

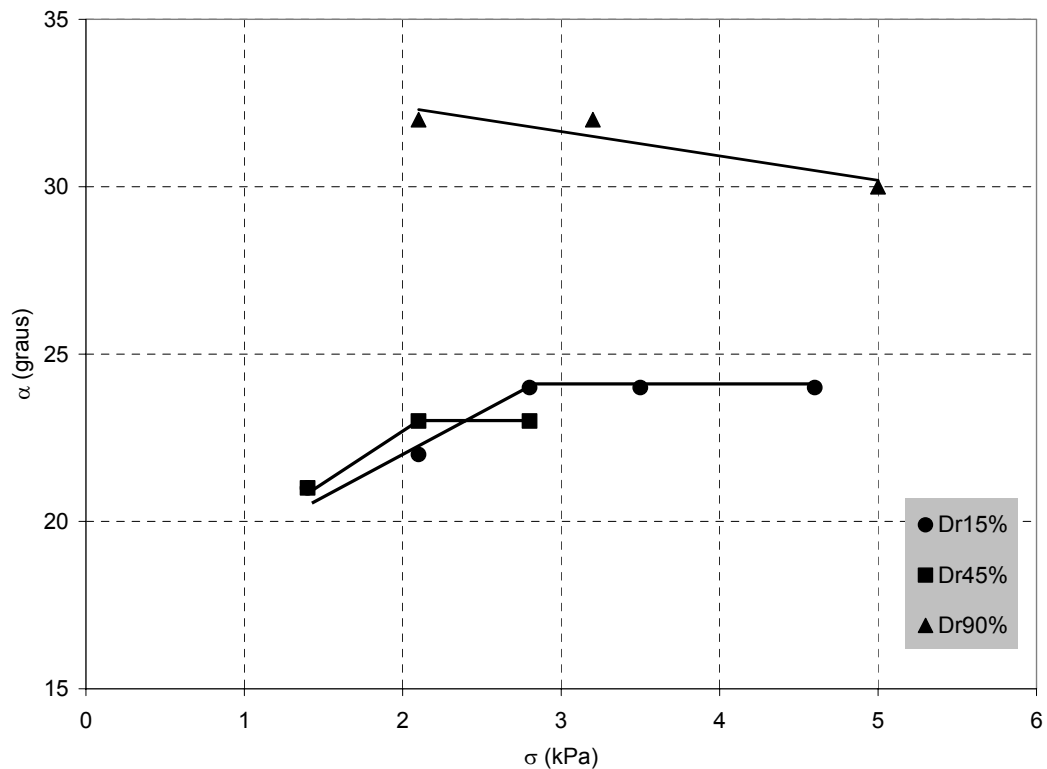


Figura 218 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas da interface areia-geogrelha.

A Figura 219 apresenta uma comparação entre as envoltórias de resistência da interface areia-geogrelha para as três densidades relativas, onde se obteve os seguintes parâmetros de interface: 0,2kPa de adesão e 25,9° de ângulo de atrito da interface para areia na densidade relativa de 15%, 0,2kPa de adesão e 26,0° de ângulo de atrito da interface para areia com $Dr = 45\%$ e 0,3kPa de adesão e 28,6° de ângulo de atrito da interface para areia com $Dr = 90\%$. Assim, o aumento da densidade relativa corresponde a um acréscimo de 0,1kPa na adesão e de 2,7° no ângulo de atrito de interface.

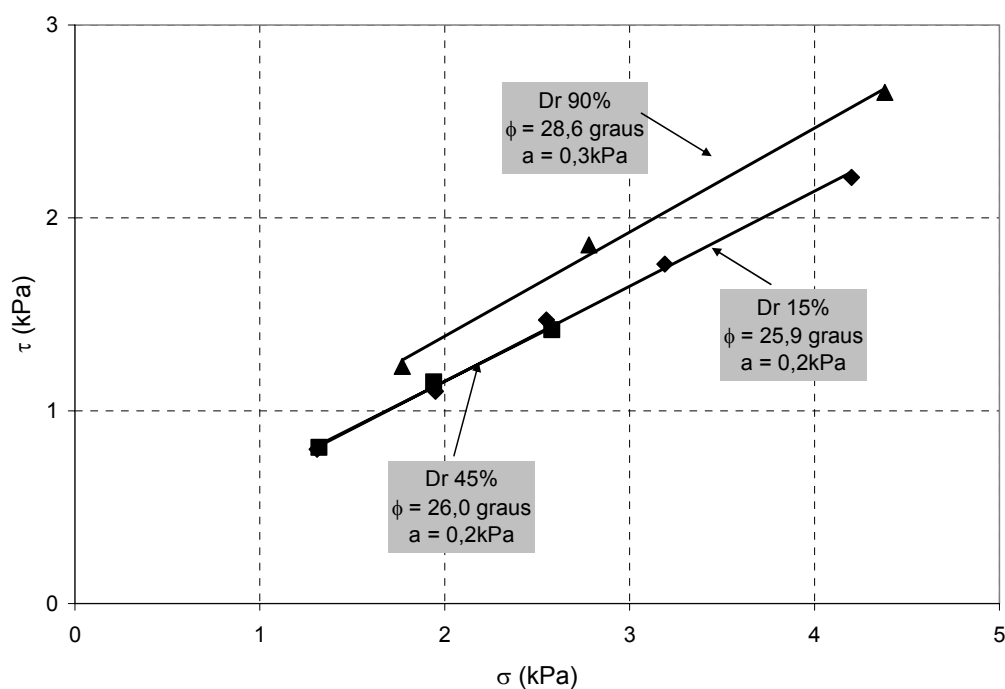


Figura 219 - Envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

7.3.3. Interface Solo-Geomembrana

As Tabelas 40 e 41 e as Figuras 220 e 221 apresentam os resultados de ensaios de rampa na interface solo-geomembrana onde foram utilizadas duas geomembranas, Cipageo e Polimanta, com três valores de densidade relativa e diferentes níveis de tensão de confinamento.

Na Tabela 40 constata-se que, para as densidades de 15 e 45%, os deslocamentos aumentam com o aumento da tensão confinante, ao contrário do que ocorre com a interface na densidade relativa de 90%. A Figura 220 indica, inclusive, uma ruptura brusca na interface com $D_r=90\%$. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da densidade relativa e as características do geossintético. O acréscimo da densidade relativa acarreta num aumento do embricamento entre os grãos da areia tornando o sistema mais rígido. Por sua vez, a geomembrana de PVC (Cipageo) é flexível, permitindo que os grãos da areia se deformem, ou seja, embricando. Desta forma, a resistência da interface é maior, porém rompe a pequenas deformações.

Em relação à interface areia-geomembrana Polimanta, observa-se na Tabela 41 que, para a densidade relativa de 15%, há uma redução nos deslocamentos com o aumento da tensão confinante. Para as outras duas densidades relativas constata-se que, independente da tensão confinante aplicada, os deslocamentos na ruptura são semelhantes e muito reduzidos. Ressalta-se que os deslocamentos na ruptura da interface na densidade relativa de 90% são ainda menores que os da densidade relativa de 45%.

Tabela 40 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geomembrana Cipageo e $D_r = 15, 45$ e 90%

Dr (%)	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
15	1,4	1,50	15	1,36	0,54	0,40	21,7
	2,1	2,50	16	2,02	0,81	0,40	21,8
	3,5	3,50	17	2,67	1,06	0,40	21,6
45 (*)	2,1	0,25	22	1,90	0,86	0,45	24,3
	3,2	0,50	22	3,00	1,30	0,43	23,4
	5,0	1,75	22	4,66	1,97	0,42	22,9
90 (*)	2,7	0,00	26	2,41	1,28	0,53	28,0
	3,9	0,75	25	3,51	1,74	0,49	26,3
	5,1	0,00	24	4,62	2,15	0,47	25,0

(*) Rezende (2005)

Tabela 41 - Ensaio de rampa para as interfaces areia-geomembrana Polimanta e Dr = 15, 45 e 90%.

Dr (%)	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
15	1,4	2,25	9	1,39	0,35	0,25	14,2
	2,8	0,75	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	4,6	0,25	9	4,56	0,85	0,19	10,6
45	1,4	1,25	9	1,40	0,35	0,25	14,1
	2,1	0,75	9	2,09	0,46	0,22	12,5
	2,8	1,25	9	2,77	0,57	0,21	11,6
90	1,4	0,50	9	1,41	0,35	0,25	14,1
	2,1	0,75	9	2,10	0,46	0,22	12,4
	2,8	0,75	9	2,79	0,57	0,21	11,6

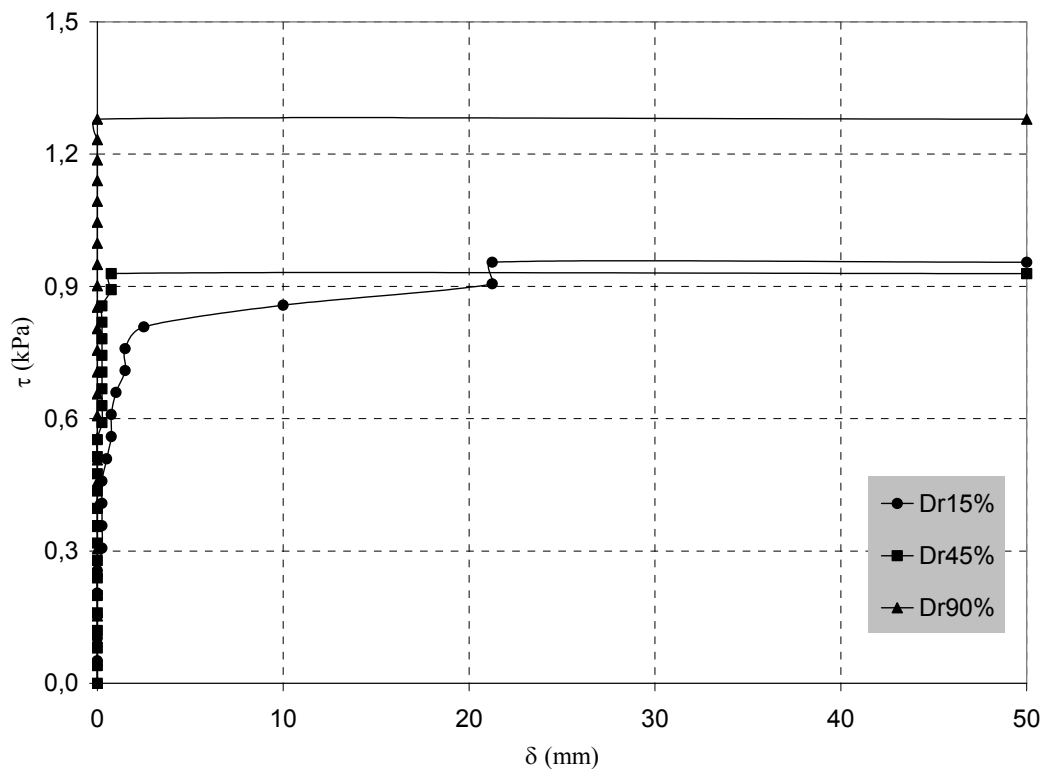


Figura 220 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana Cipageo nas densidade relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,1kPa, em ensaios de rampa.

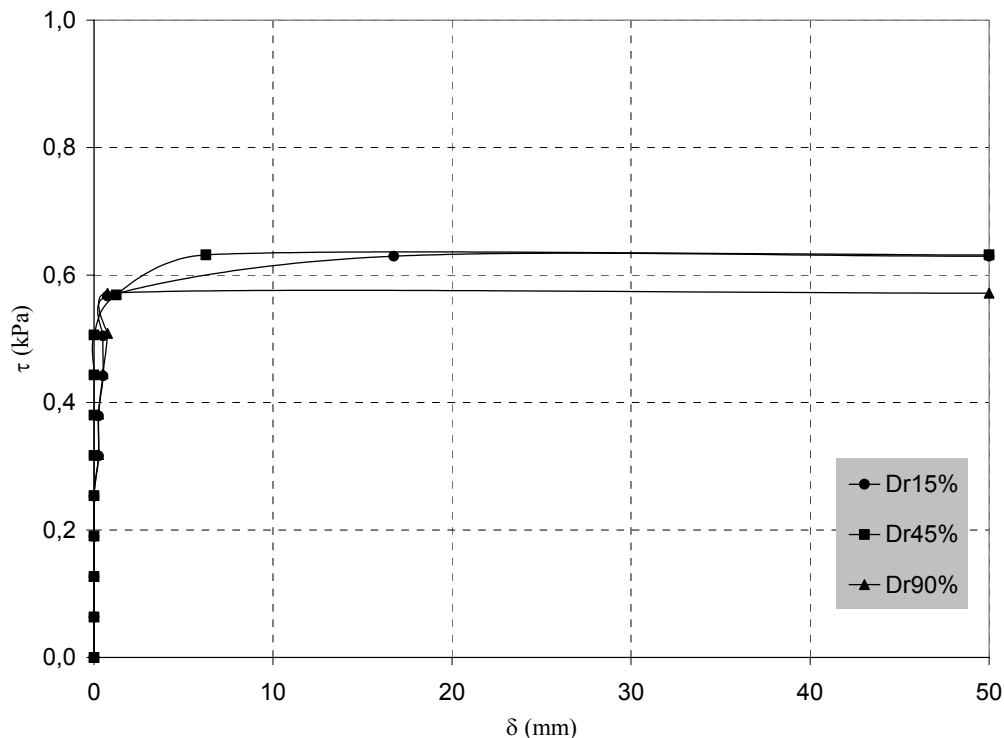


Figura 221 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana Polimanta nas densidades relativas de 15, 45 e 90% e tensão confinante de 2,8kPa, em ensaios de rampa.

O efeito da densidade relativa com relação aos ângulos de rampa é distinto para os dois tipos de interfaces ensaiadas (Figuras 222 e 223). Para interfaces areia-geomembrana Cipageo observa-se um comportamento parecido com o da interface areia-areia, onde a diferença entre o ângulo de rampa do material mais denso e do material mais fofo diminuiu com o aumento da tensão confinante (Figura 222).

No caso da interface areia-geomembrana Polimanta (Figura 223) a variação da densidade relativa não afeta o valor do ângulo de rampa de ruptura. A explicação para este comportamento pode estar associada à estrutura lisa e polida desta geomembrana que não permite o imbricamento das partículas do solo no geossintético.

As Figuras 224 e 225 apresentam as envoltórias de resistência para as interfaces areia-geomembrana Cipageo e areia-geomembrana Polimanta, respectivamente. Os parâmetros obtidos para a interface areia-geomembrana Cipageo (Figura 224) foram: 0kPa de adesão e 21,6° de ângulo de atrito de interface para areia na densidade relativa de 15%, 0kPa de adesão e 22,0° de

ângulo de atrito de interface para areia na densidade relativa de 45% e 0kPa de adesão e 21,6° de ângulo de atrito para areia na densidade relativa de 90%.

Para a interface areia-geomembrana Polimanta (Figura 225), os parâmetros obtidos foram sempre iguais a 0,1kPa de adesão e 9° de ângulo de atrito de interface para areia nas densidades relativas de 15, 45% e 90%.

Pode-se concluir que não há variação significativa do ângulo de atrito de interface e da adesão das duas interfaces areia-geomembrana com o aumento da densidade relativa.

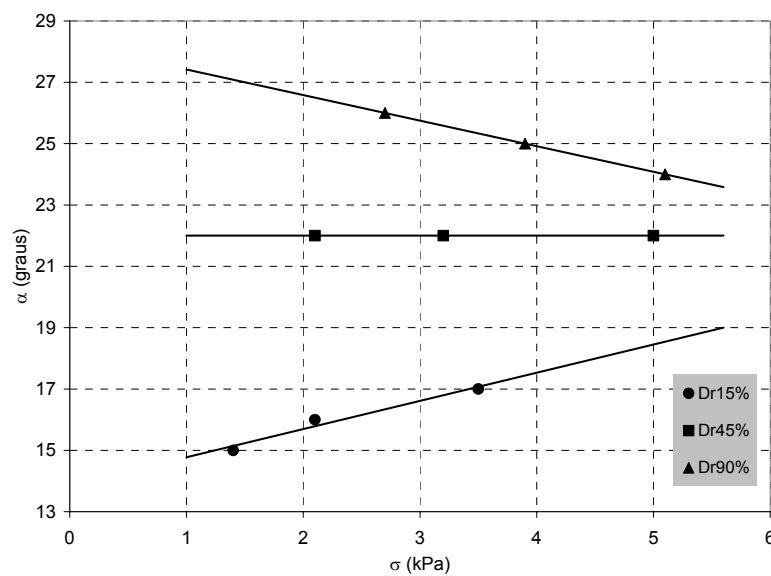


Figura 222 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas - Interface areia-geomembrana Cipageo.

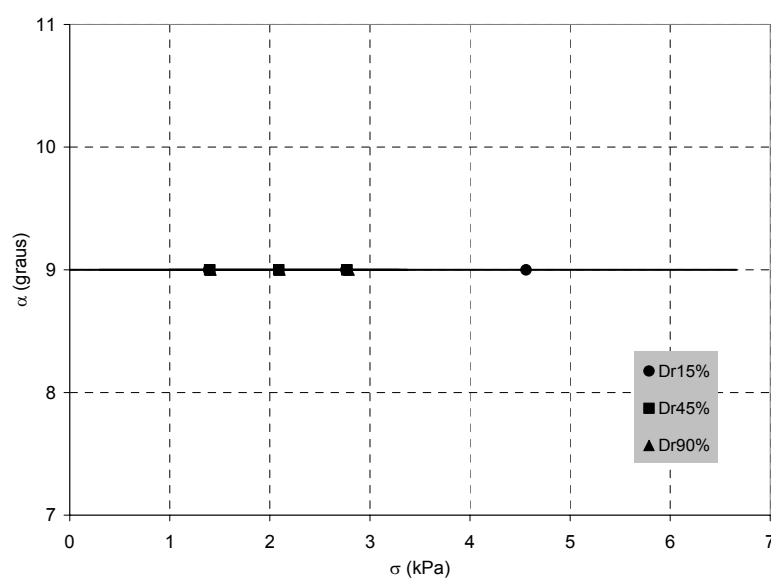


Figura 223 - Influência do aumento da tensão confinante nos resultados de ensaios de rampa para diferentes densidades relativas - Interface areia-geomembrana Polimanta.

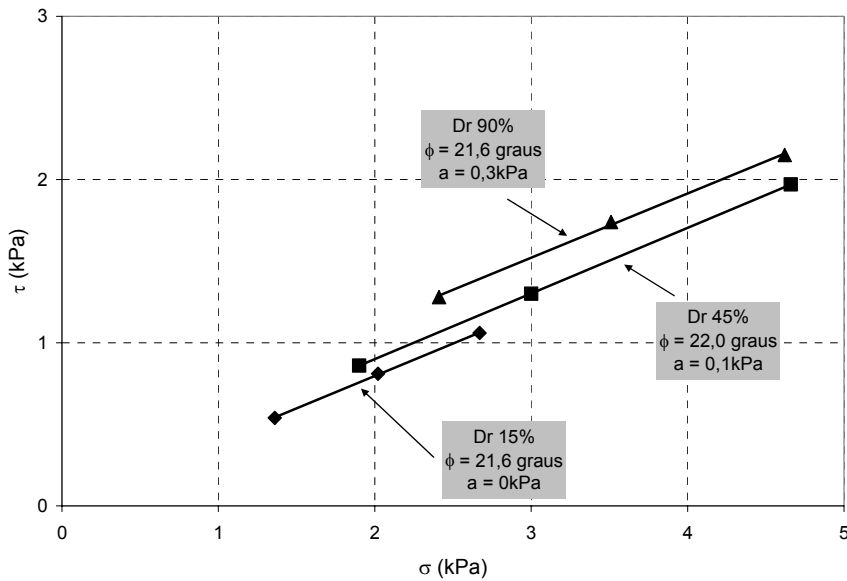


Figura 224 - Envolvórias de resistência das interfaces areia-geomembrana Cipageo nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

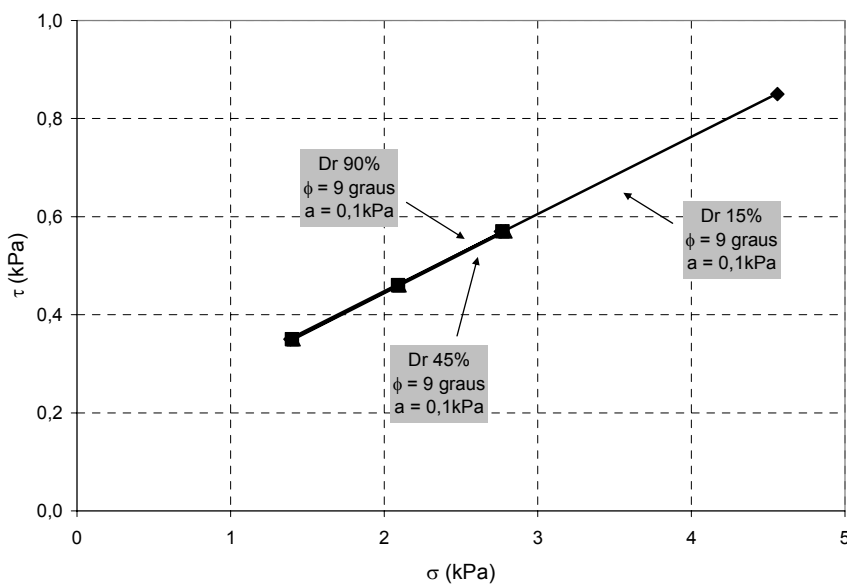
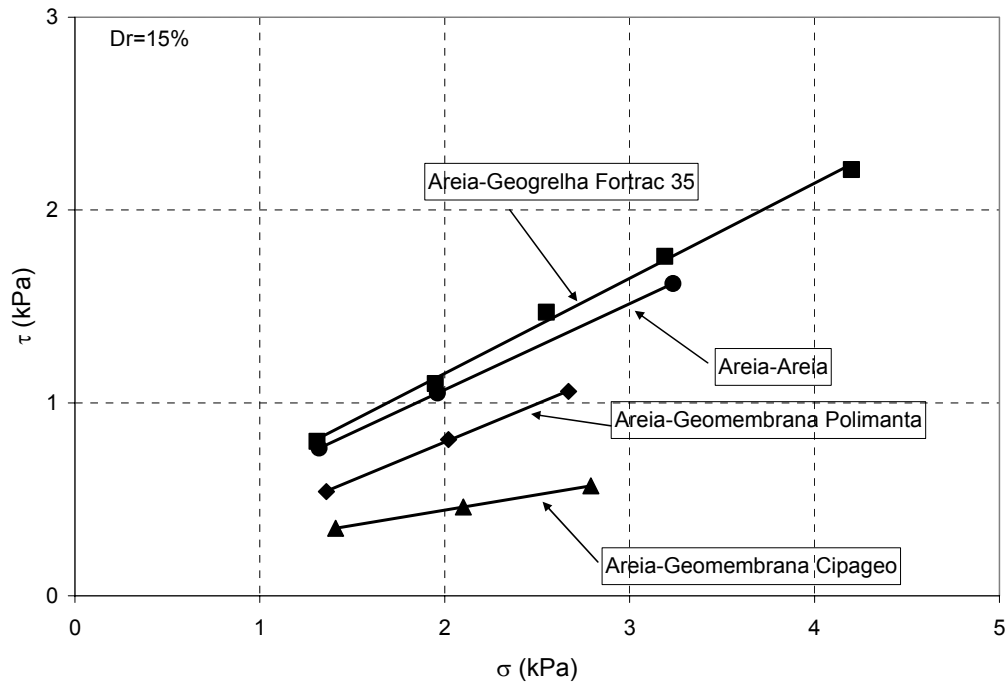


Figura 225 - Envolvórias de resistência das interfaces areia-geomembrana Polimanta nas densidades relativas de 15, 45 e 90%, obtidas em ensaios de rampa.

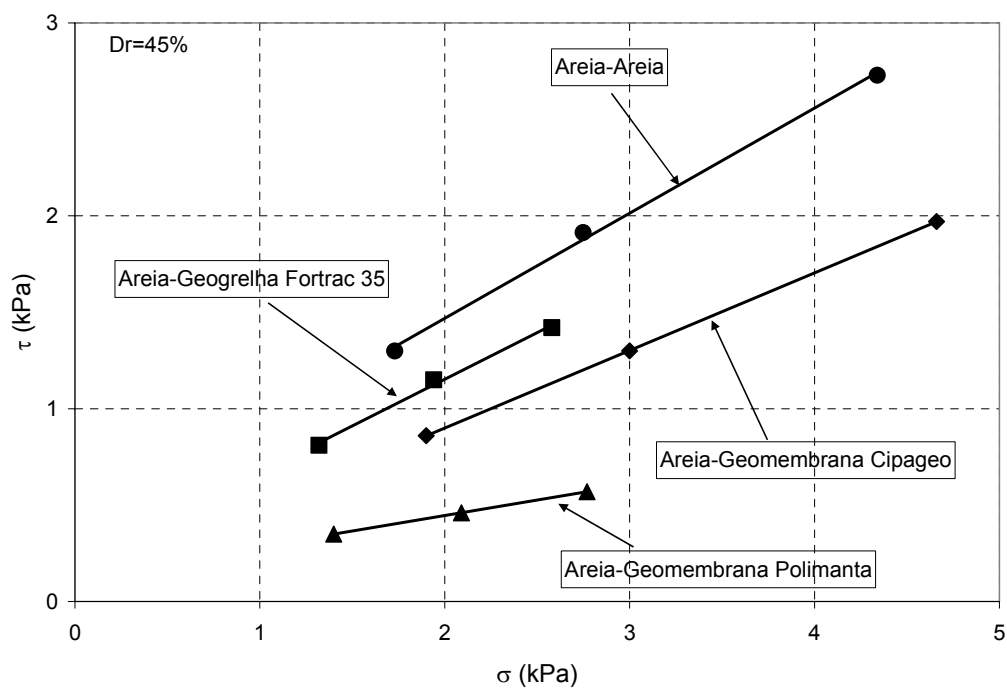
7.3.4. Eficiências de Interfaces

A Figura 226 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha e areia-geomembrana (Cipageo e Polimanta), ensaiadas nas três densidades relativas (15, 45 e 90%). A Tabela 42 apresenta um resumo dos

parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) para cada uma das interfaces.

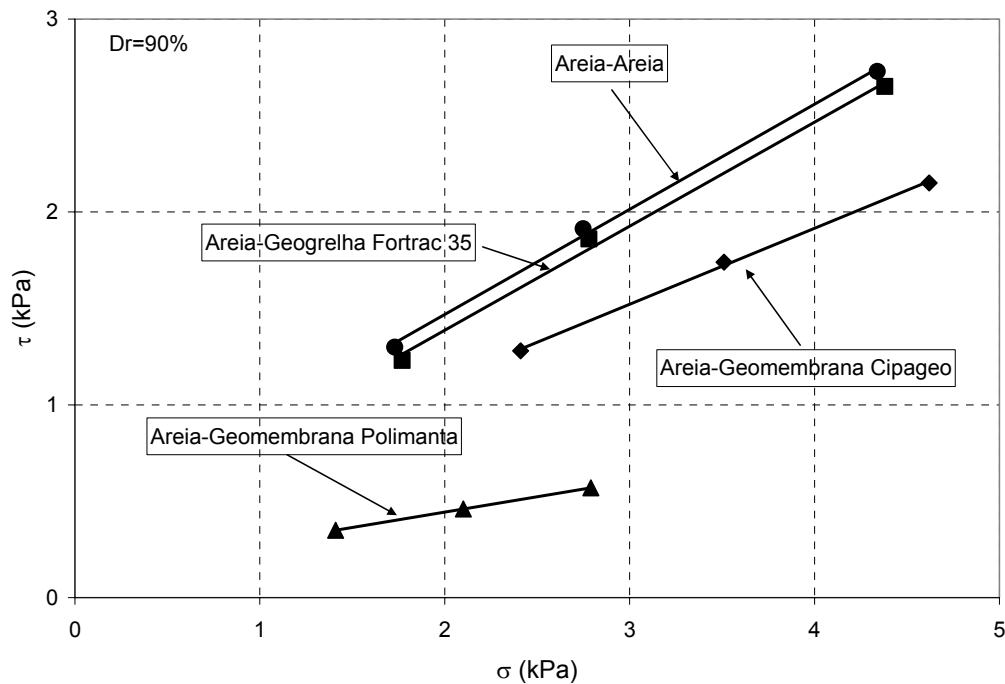


(a)



(b)

Figura 226 - Envoltórias de resistência das interfaces ensaiadas em areia com: (a) Dr=15%; (b) Dr=45% e (c) Dr=90%, obtidas em ensaios de rampa.



(c)

Figura 226 (cont.) - 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.

Tabela 42 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces, em ensaios de rampa.

Interface	D_r (%)	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c (*)	E_ϕ
Ar x GG35	15	0,2	25,9	1,00	1,08
	45	0,2	26,0	1,00	0,96
	90	0,3	28,6	0,75	0,99
Ar x GMCP	15	0,0	21,6	0,00	0,90
	45	0,1	22,0	0,50	0,81
	90	0,3	21,6	0,75	0,75
Ar x GMPL	15	0,1	9,00	0,50	0,38
	45	0,1	9,00	0,50	0,33
	90	0,1	9,00	0,25	0,31

As eficiências foram calculadas através das Equações 19 e 20 (Capítulo 5), considerando os parâmetros de resistência da interface areia-areia, obtidos dos ensaios de rampa para as três densidades relativas.

De acordo com a Tabela 42, observa-se que, para as interfaces areia-geomembrana, os valores de E_{ϕ} são menores que os da interface areia-geogrelha. Estes valores reduzidos de E_{ϕ} na interface areia-geomembrana são conseqüentes da baixa rugosidade da superfície do geossintético. No caso da geogrelha, os maiores valores são decorrentes da resistência oferecida pelo imbricamento dos grãos do solo com a malha da geogrelha.

A Tabela 42 mostra também que o aumento da densidade relativa corresponde a uma redução dos valores de E_{ϕ} para todas as interfaces. Entretanto, ela é mais acentuada para as interfaces solo-geomembrana.

7.4. Influência do Tipo de Solo

7.4.1. Interface Solo-Solo

Para avaliar a influência do tipo de solo foram comparados uma série de ensaios de rampa nas interfaces areia-areia e brita-brita (Tavares, 2008) com densidade relativa de 15%.

A Tabela 43 e Figura 227 apresentam uma comparação entre os resultados dos ensaios de rampa nas duas interfaces.

Tabela 43 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-areia e brita-brita

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
Areia	1,4	9,8	20	1,32	0,77	0,58	30,1
	2,1	6,5	21	1,96	1,05	0,54	28,2
	3,5	3,0	22	3,23	1,62	0,50	26,6
Brita (*)	1,1	6,3	28	0,90	0,75	0,83	39,8
	1,8	14,0	32	1,46	1,22	0,83	39,8
	2,5	23,5	34	2,01	1,68	0,84	39,9

(*) Tavares (2008)

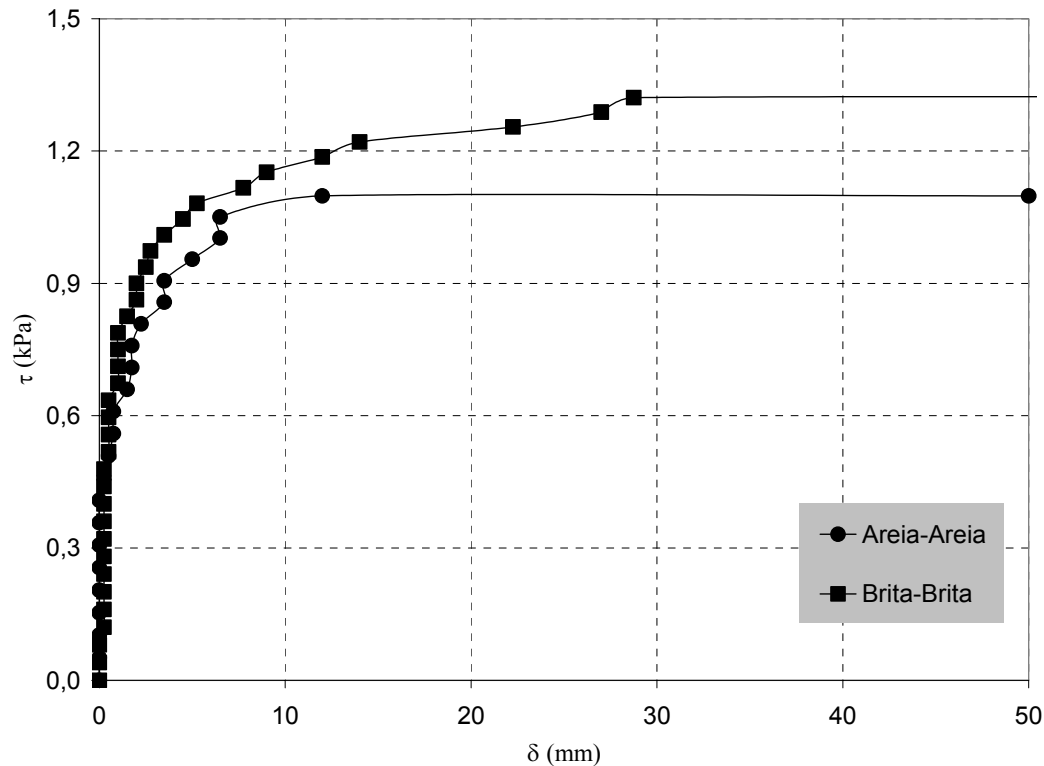


Figura 227 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-areia e brita-brita e tensão confinante intermediária, obtidas em ensaios de rampa.

Considerando a Tabela 43 e Figura 227, pode-se observar que o comportamento da interface brita-brita é diferente da interface areia-areia. No caso da interface areia-areia, nota-se que a ruptura é atingida para menores deslocamentos, quando comparada à interface brita-brita. Observa-se, também, que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante no caso da interface areia-areia, enquanto que na interface brita-brita tendem a aumentar.

A ocorrência de grandes deslocamentos na interface brita-brita pode ser explicada pela possibilidade de rearranjo e maior imbricamento dos grãos da brita ao longo do ensaio.

Em termos de ângulo de rampa na ruptura, os resultados indicam que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de ângulo de rampa à medida que a tensão confinante aumenta.

A Figura 228 exhibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 24,0° para a interface areia-areia e coesão de 0kPa

e ângulo de atrito de $39,9^\circ$ para a interface brita-brita. Assim, conclui-se que o aumento da granulometria da areia para a brita corresponde a um acréscimo do ângulo de atrito de $15,9^\circ$.

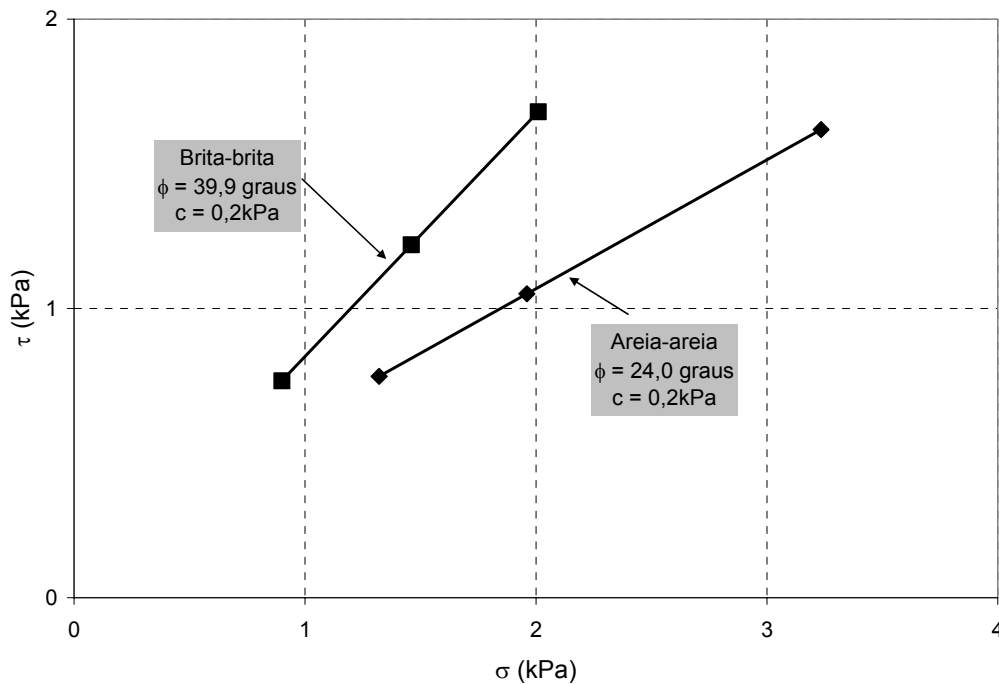


Figura 228 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita com densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.

7.4.2. Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 44 apresenta os resultados de ensaios de rampa para interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha realizados nesta pesquisa e por Taveres (2008). A Figura 229 apresenta as curvas tensão cisalhante vs deslocamento para uma tensão confinante intermediária (2,1kPa para interface areia-geogrelha e 1,8kPa para interface brita-geogrelha).

Tabela 44 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Areia	1,4	3,3	21	1,31	0,80	0,61	31,4
	2,1	4,5	22	1,95	1,10	0,56	29,4
	2,8	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
	3,5	6,8	24	3,19	1,76	0,55	28,9
	4,6	4,3	24	4,20	2,21	0,53	27,7
Brita (*)	1,1	8,8	32	0,87	0,85	0,98	44,4
	1,8	5,5	34	1,43	1,29	0,90	42,0
	2,5	6,0	34	2,01	1,68	0,84	39,9

(*) Tavares (2008)

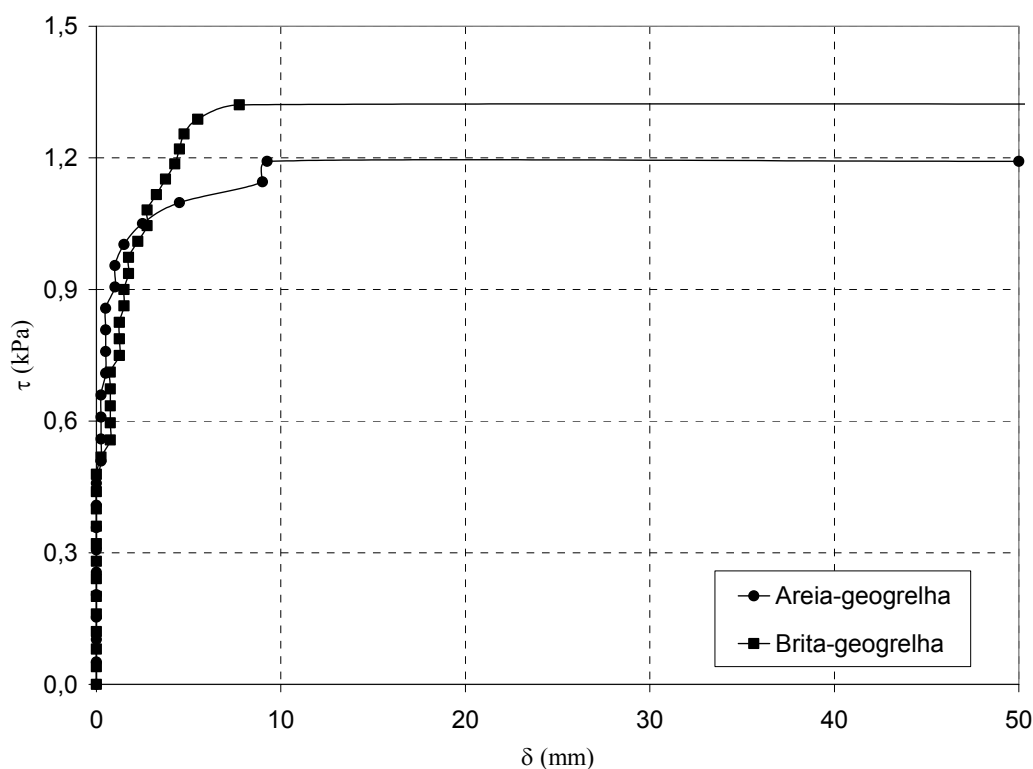


Figura 229 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha e tensão confinante intermediária, em ensaios de rampa.

Observando os resultados obtidos (Tabela 44 e Figura 229), percebe-se que a inclusão da geogrelha provoca uma redução dos deslocamentos e um aumento do ângulo de rampa quando comparado com a interface brita-brita. Desta forma,

conclui-se que o travamento da brita na malha da geogrelha aumenta o ângulo de rampa na ruptura.

Os resultados da Tabela 44 indicam que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo tanto dos valores de deslocamento quanto dos ângulos de rampa na ruptura.

Observa-se, também, que com aumento da tensão confinante, os valores dos ângulos de rampa aumentam 3° para interface areia-geogrelha e 2° para interface brita-geogrelha.

A Figura 230 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de $25,9^\circ$ para a interface areia-areia e adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de $36,0^\circ$ para a interface brita-brita. Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de $10,1^\circ$ no ângulo de atrito de interface.

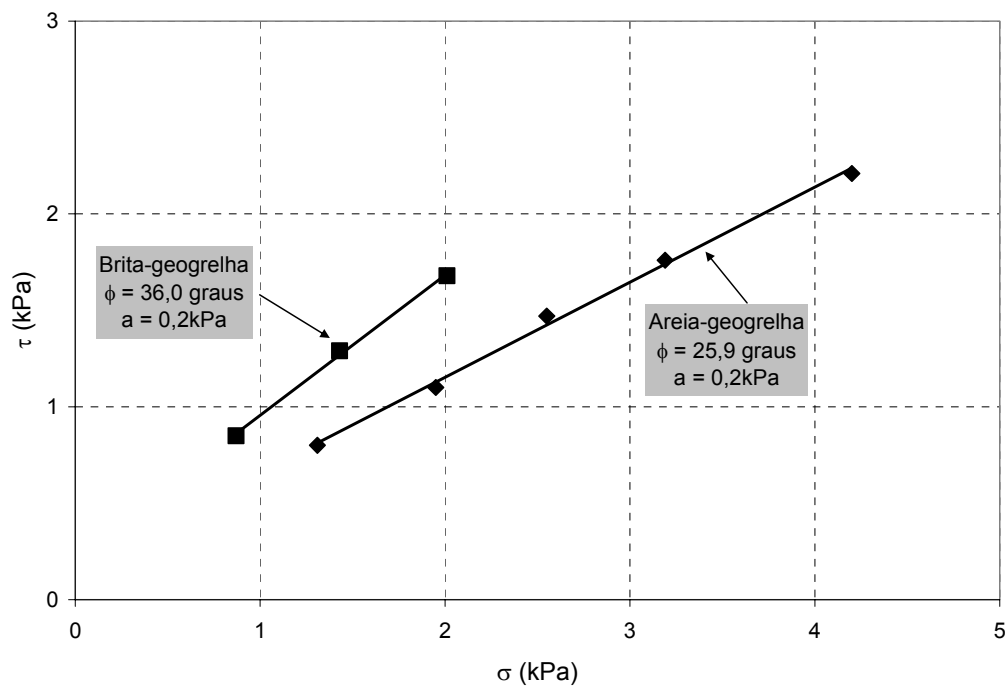


Figura 230 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.

7.4.3. Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 45 e Figura 231 apresentam uma comparação entre os resultados típicos das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana. A geomembrana utilizada nesta comparação foi a Polimanta, somente.

Tabela 45 - Resultados dos ensaios de rampa para as interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Areia	1,4	2,25	9	1,39	0,35	0,25	14,2
	2,8	0,75	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	4,6	0,25	9	4,56	0,85	0,19	10,6
Brita (*)	1,1	0,50	15	0,99	0,42	0,42	22,8
	1,8	6,25	17	1,66	0,68	0,41	22,2
	2,5	3,50	19	2,30	0,98	0,43	23,1

(*) Tavares (2008)

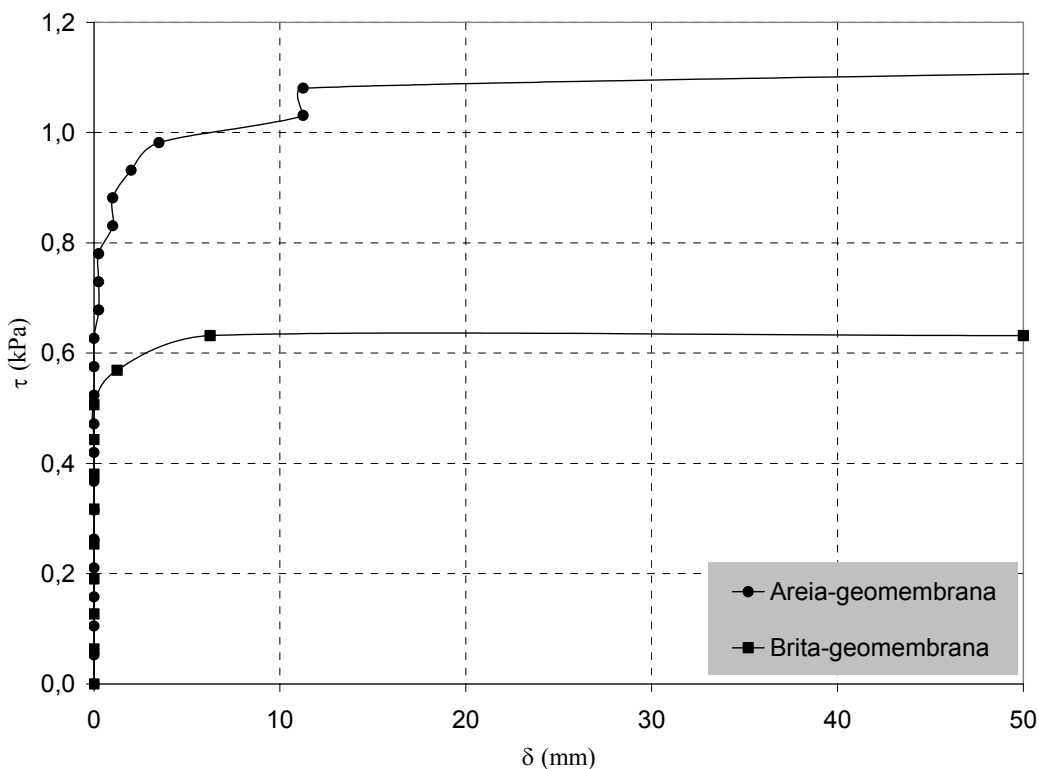


Figura 231 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geomembrana (2,8kPa) e brita-geomembrana (2,5kPa), em ensaios de rampa.

De acordo com a Tabela 45, nota-se que o aumento da tensão confinante provoca uma diminuição dos deslocamentos máximos na ruptura. Não há alteração no ângulo de rampa de ruptura para a interface areia-geomembrana. Já para a interface brita-geomembrana observa-se que os deslocamentos na ruptura aumentam, assim como os ângulos de rampa na ruptura.

Observa-se que o efeito da granulometria do solo é maior com o aumento da tensão confinante, visto que o aumento do ângulo de rampa é de apenas 6° para as menores tensões, atingindo 10° para as maiores tensões.

A Figura 232 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de $0,1\text{kPa}$ e ângulo de atrito de 9° para a interface areia-geomembrana e adesão de 0kPa e ângulo de atrito de $22,8^\circ$ para a interface brita-geomembrana. Assim, conclui-se que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de $13,8^\circ$ no ângulo de atrito de interface.

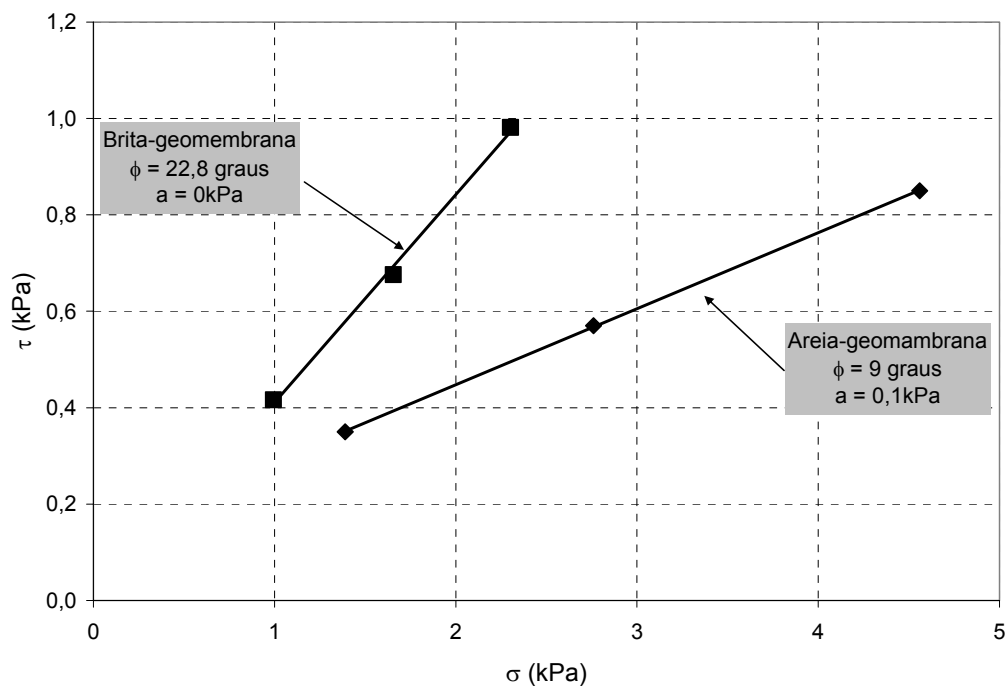
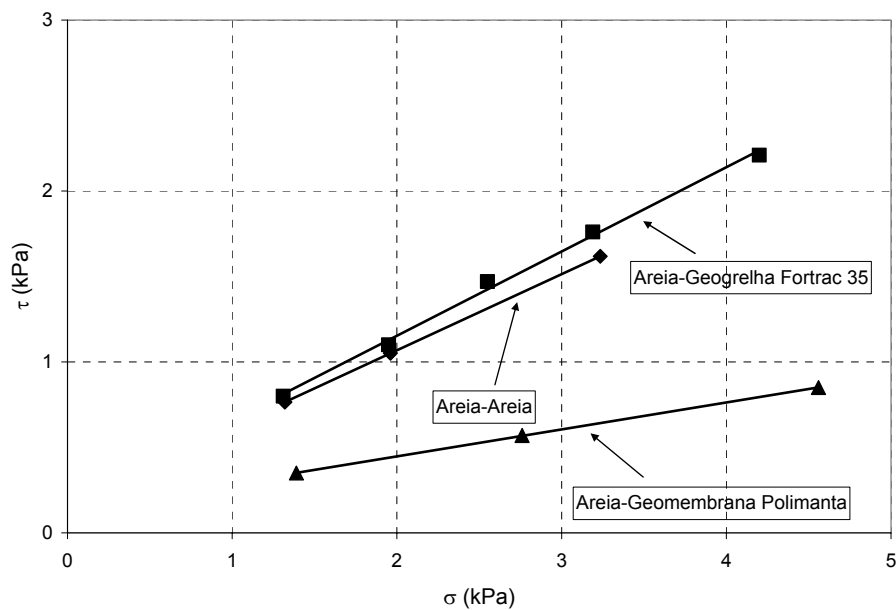


Figura 232 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, obtidas em ensaios de rampa.

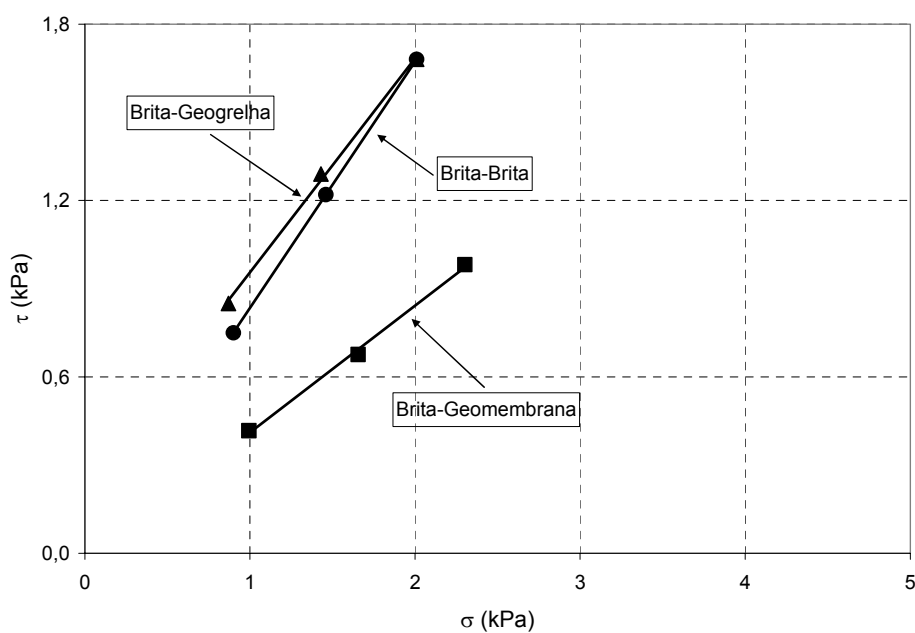
7.4.4. Eficiências de Interface

A Figura 233 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces areia-geossintético e brita-geossintético estudadas nesta pesquisa.

A Tabela 46 resume os parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ).



(a)



(b)

Figura 233 - Envoltórias de resistência das interfaces com: (a) areia e (b) brita.

Tabela 46 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces.

Interface	Dr (%)	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
Ar x GG35	15	0,2	25,9	1,00	1,08
B0 x GG35	15	0,2	36,0	1,00	0,90
Ar x GMPL	15	0,1	9,00	0,50	0,38
B0 x GMPL	15	0,0	22,8	0,00	0,57

Os parâmetros de eficiência E_c e E_ϕ foram calculados considerando os parâmetros de resistência dos dois tipos de solo obtidos dos ensaios de rampa. Na Tabela 46, observa-se que o aumento da granulometria tem efeitos diferentes para as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana. Para a interface solo-geogrelha, este aumento corresponde a uma redução de eficiência em termos de ângulo de atrito, sem variação de eficiência em termos de coesão. Nas interfaces solo-geomembrana, observa-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento de eficiência em termos de ângulo de atrito e uma redução em termos de coesão.

7.5. Influência do Tipo de Geossintético

Para analisar a influência do tipo de geossintético, foram considerados ensaios representativos das interfaces solo-geossintético executados no equipamento de rampa sob tensão de confinamento intermediária (2,6kPa). A Tabela 47 apresenta os resultados dos ensaios. A geomembrana utilizada foi a Polimanta.

Tabela 47 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 2,6kPa e Dr=15%, em ensaio de rampa

Geossintético	Solo	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
Geogrelha	Areia	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
	Brita(*)	6,0	34	2,01	1,68	0,84	39,9
Geomembrana	Areia	0,8	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	Brita(*)	3,5	19	2,30	0,98	0,43	23,1

(*) Tavares (2008)

Na Tabela 48, pode-se observar que, para cada tipo de interface, os maiores valores de ângulo de rampa na ruptura correspondem à geogrelha. As duas interfaces (geogrelha e geomembrana) apresentaram uma diferença de ângulo de rampa de ruptura igual a 10°. Os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da granulometria.

Tabela 48 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces com $D_r = 15\%$, em ensaios de rampa

Geossintético	Solo	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)
Geogrelha	areia	0,2	25,9
	brita	0,2	36,0
Geomembrana	areia	0,1	9,0
	brita	0,0	22,8

7.6.

Considerações Finais

O capítulo apresentou uma análise das resistências de interfaces solo-geossintético obtidas em ensaios de rampa. Nestes estudos foram avaliados a influência da densidade relativa, tipo de solo, tipo de geossintético e tensão confinante nos resultados dos ensaios. Desta forma, foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de rampa executados no programa experimental desta pesquisa e de Tavares (2008).

O programa experimental envolveu ensaios de rampa em três tipos de geossintéticos e um solo (areia). A areia foi utilizada nas densidades relativas de 15, 45 e 90%. Foram realizados ensaios de interface solo-solo, obtendo-se os parâmetros de resistência a baixas tensões normais, nas mesmas condições dos ensaios de interface. Com isso, foram calculados os valores de eficiência da interface.

Analisou-se a influência da tensão confinante e concluiu-se que seu aumento tem conseqüências distintas. Nas interfaces solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana Cipageo o aumento da tensão confinante corresponde a um aumento do ângulo de rampa. Entretanto, para a interface areia-geomembrana Polimanta, independente da densidade relativa, não há variação do ângulo de

rampa na ruptura. O comportamento desta interface é condicionado pela estrutura da geomembrana lisa e polida.

Com relação a influência da densidade relativa do solo, têm-se como principais conclusões que o aumento de 15 para 90% corresponde a um aumento de 2,7° no ângulo de atrito de interface para a geogrelha. Para as duas interfaces com geomembranas, não se observou variação significativa no ângulo de atrito. Desta forma, conclui-se, que para todas as interfaces ensaiadas há uma perda de eficiência, sendo mais acentuada nas interfaces solo-geomembrana. Nas três interfaces, o aumento da densidade relativa corresponde a uma redução dos deslocamentos na ruptura. Entretanto, não se observa tendência quanto à variação do ângulo de rampa, pois a interface areia-geogrelha apresenta uma tendência de elevação do ângulo de rampa, a interface solo-geomembrana Cipageo uma redução e na interface solo-geomembrana Polimanta não se observa variação.

Quanto à influência do tipo de solo, observou-se nas interfaces ensaiadas que o aumento da granulometria corresponde a um aumento do ângulo de atrito. Verifica-se, também, que há uma redução da eficiência na interface solo-geogrelha e um aumento para a interface solo-geomembrana.

Por fim, com relação ao tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas às interfaces solo-geogrelha. Isto pode ser explicado pelo tipo de estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência pelo fato de possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo com as aberturas da malha da geogrelha.

8. Resultados e Análises: Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

8.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os ensaios de cisalhamento direto convencional realizados nesta pesquisa. Avalia-se a influência da tensão confinante, tipo de solo e tipo de geossintético.

As envoltórias de resistência das interfaces foram obtidas através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais distintas. Os ensaios são identificados pelo valor inicial da tensão normal, ou seja, a tensão aplicada pelas placas de aço mais a camada de solo da caixa superior com a plataforma de ensaio na posição horizontal. É importante ressaltar que os valores de tensão normal e cisalhante utilizados para obtenção das envoltórias de resistência são os correspondentes à condição de ruptura.

A parcela da tensão confinante referente à camada de solo depende do tipo de material, espessura da camada de solo e densidade relativa. Desta forma, em todas as análises são especificadas as tensões confinantes consideradas.

Adotou-se a mesma convenção de siglas do Capítulo 7 para identificação dos ensaios realizados: Ar para areia; B0 para brita; GMPL para geomembrana Polimanta; GG35 para geogrelha Fortrac; 15 para densidade relativa igual a 15%. Por exemplo, a sigla AR15xGG35 corresponde ao ensaio de interface areia-geogrelha com $D_r = 15\%$.

8.2. Influência da Tensão Confinante

A Tabela 49 apresenta os resultados mais representativos em todas as interfaces ensaiadas para, no mínimo, três tensões confinantes diferentes.

Tabela 49 - Influência da tensão confinante nas tensões cisalhantes de ruptura ($D_r = 15\%$)

Interface	τ (kPa)								$\Delta\tau$ (kPa)
	$\sigma_n=$ 1,1 kPa	$\sigma_n=$ 1,8 kPa	$\sigma_n=$ 3,2 kPa	$\sigma_n=$ 4,6 kPa	$\sigma_n=$ 5,6 kPa	$\sigma_n=$ 6,3 kPa	$\sigma_n=$ 7,0 kPa	$\sigma_n=$ 8,4 kPa	
Ar x Ar	0,93	1,36	2,36	3,11	3,59	~	4,30	~	+3,37
Ar x GG35	~	1,36	2,18	3,07	~	~	4,55	5,42	+4,06
Ar x GMPL	~	~	0,66	~	~	1,32	~	1,82	+1,16

De acordo com a Tabela 49, pode-se observar que o aumento da tensão confinante acarretou em comportamentos semelhantes no que concerne à tensão cisalhante de ruptura para as diferentes interfaces ensaiadas. Percebe-se que a interface areia-geogrelha sofre a maior influência do efeito da tensão confinante, com um aumento de 4,06kPa na tensão cisalhante de ruptura, seguida das interfaces areia-areia e areia-geomembrana com um aumento de 3,37 e 1,16kPa, respectivamente.

8.3. Influência do Tipo de Solo

8.3.1. Interface Solo-Solo

Para avaliar a influência do tipo de solo foram comparados uma série de ensaios de cisalhamento direto convencional nas interfaces areia-areia e brita-brita (Tavares, 2008) com densidade relativa de 15%.

A Tabela 50 e Figura 234 apresentam uma comparação entre os resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional nas duas interfaces.

Tabela 50 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces areia-areia e brita-brita

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Brita (*)	1,0	8,0	0	1,02	0,78	0,77	37,6
	1,7	5,0	0	1,72	1,31	0,76	37,2
	2,4	8,5	0	2,42	1,77	0,73	36,1
Areia	1,1	23,5	0	1,10	0,93	0,85	40,2
	1,8	21,8	0	1,80	1,36	0,76	37,1
	3,2	15,3	0	3,19	2,36	0,74	36,5
	4,6	15,0	0	4,58	3,11	0,68	34,2
	5,6	13,5	0	5,59	3,59	0,64	32,7
	7,0	11,8	0	6,98	4,30	0,62	31,6

(*) Tavares (2008)

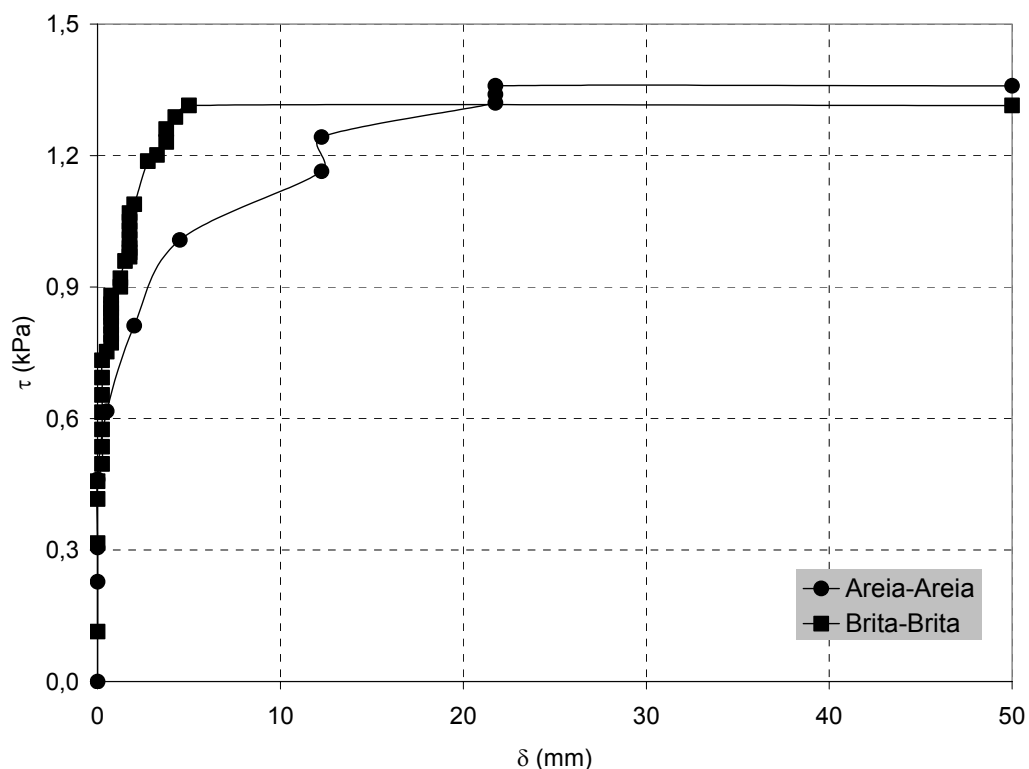


Figura 234 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa em ensaios de cisalhamento direto convencional.

Considerando a Tabela 50 e Figura 234, pode-se observar que os comportamentos das interfaces brita-brita e areia-areia são diferentes. No caso da

interface areia-areia, nota-se que a ruptura é atingida para maiores valores de deslocamento, quando comparada à interface brita-brita. Observa-se, também, que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante no caso da interface areia-areia, enquanto que na interface brita-brita não há variação significativa.

A Figura 235 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,4kPa e ângulo de atrito de 29,9°, para a interface areia-areia, e coesão de 0,1kPa e ângulo de atrito de 35,1°, para a interface brita-brita. Assim, pode-se concluir que com o aumento da granulometria do solo há um acréscimo do ângulo de atrito igual a 5,2°.

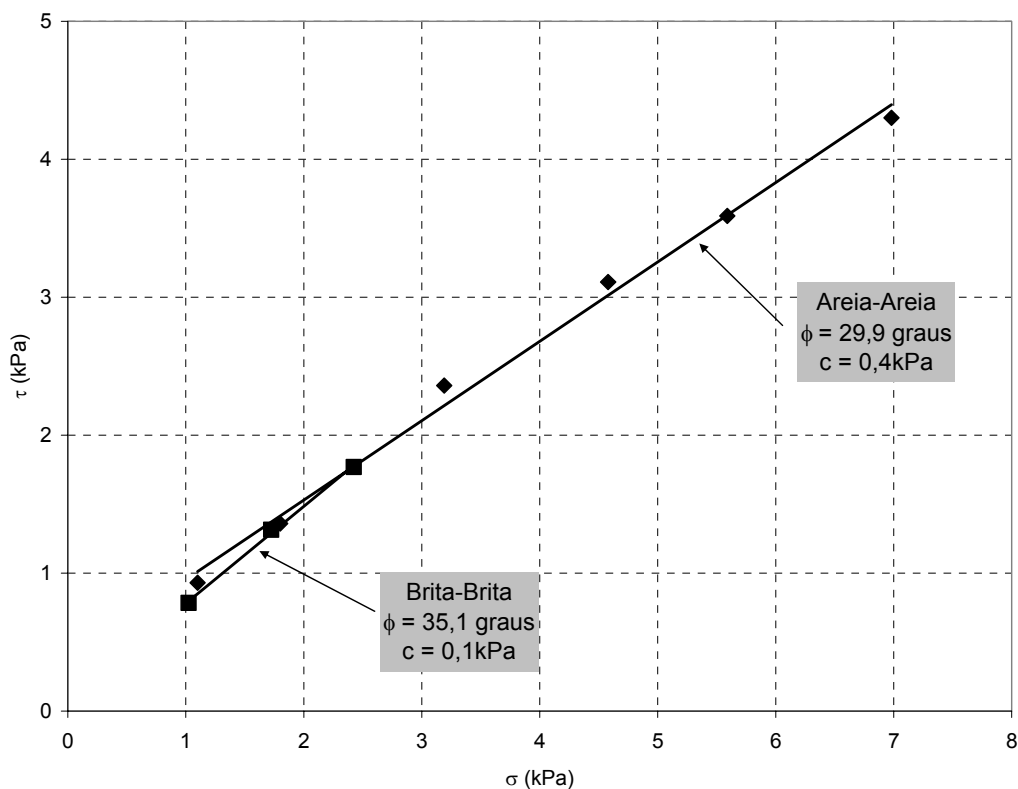


Figura 235 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%.

8.3.2. Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 51 apresenta os resultados de ensaios de cisalhamento direto convencional para interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha realizados nesta

pesquisa e por Tavares (2008). A Figura 236 apresenta as curvas tensão cisalhante vs deslocamento para uma tensão confinante intermediária (1,8kPa para interface areia-geogrelha e 1,7kPa para interface brita-geogrelha).

Tabela 51 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
Brita (*)	1,0	5,5	0	1,02	0,88	0,86	40,7
	1,7	2,3	0	1,72	1,37	0,80	38,7
	2,4	5,8	0	2,42	1,89	0,78	38,0
Areia	1,8	8,0	0	1,80	1,36	0,76	37,2
	3,2	7,3	0	3,19	2,18	0,68	34,2
	4,6	10,8	0	4,58	3,07	0,67	33,8
	7,0	6,0	0	6,98	4,55	0,65	33,0
	8,4	8,0	0	8,41	5,42	0,64	32,6

(*) Tavares (2008)

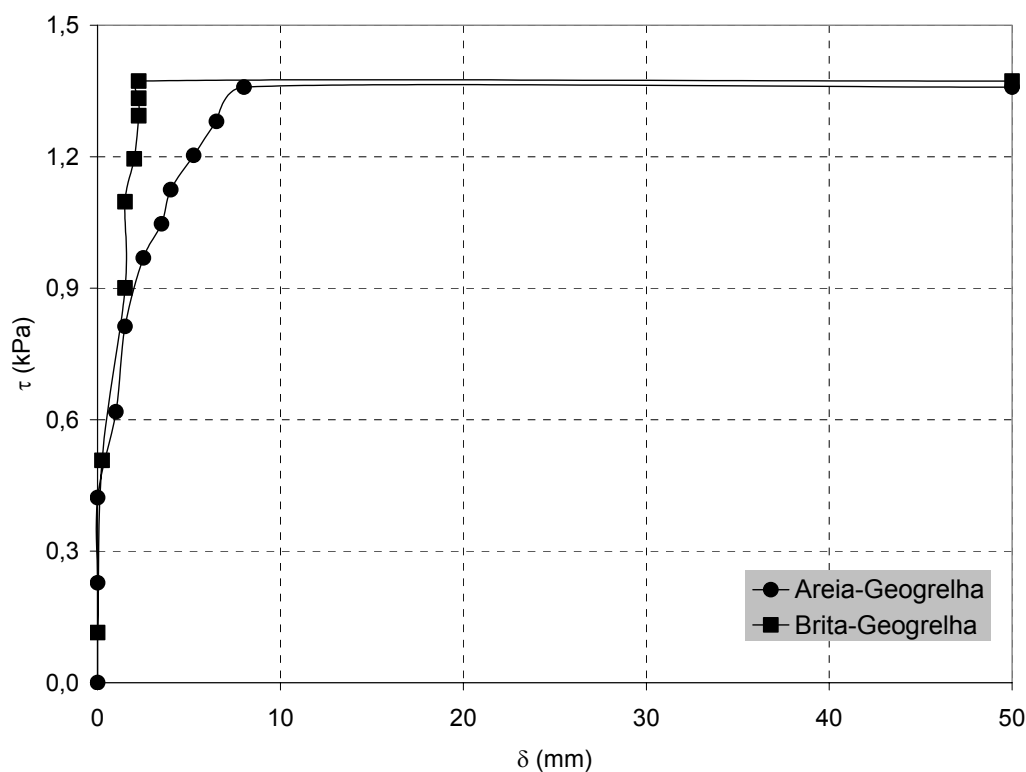


Figura 236 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa em ensaios de cisalhamento direto convencional.

Observando os resultados obtidos (Tabela 51 e Figura 236), percebe-se que a inclusão da geogrelha provoca uma redução dos deslocamentos e um aumento da tensão cisalhante de ruptura, quando comparado com os resultados das interfaces solo-solo (Tabela 50).

Os resultados da Tabela 51 indicam que o aumento da granulometria da areia para a brita promove um decréscimo dos deslocamentos na ruptura. Observa-se também o aumento dos valores das tensões cisalhantes de ruptura com o aumento da tensão confinante.

A Figura 237 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 31,7°, para a interface areia-geogrelha, e adesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 35,7°, para a interface brita-geogrelha. Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de 4° no ângulo de atrito de interface.

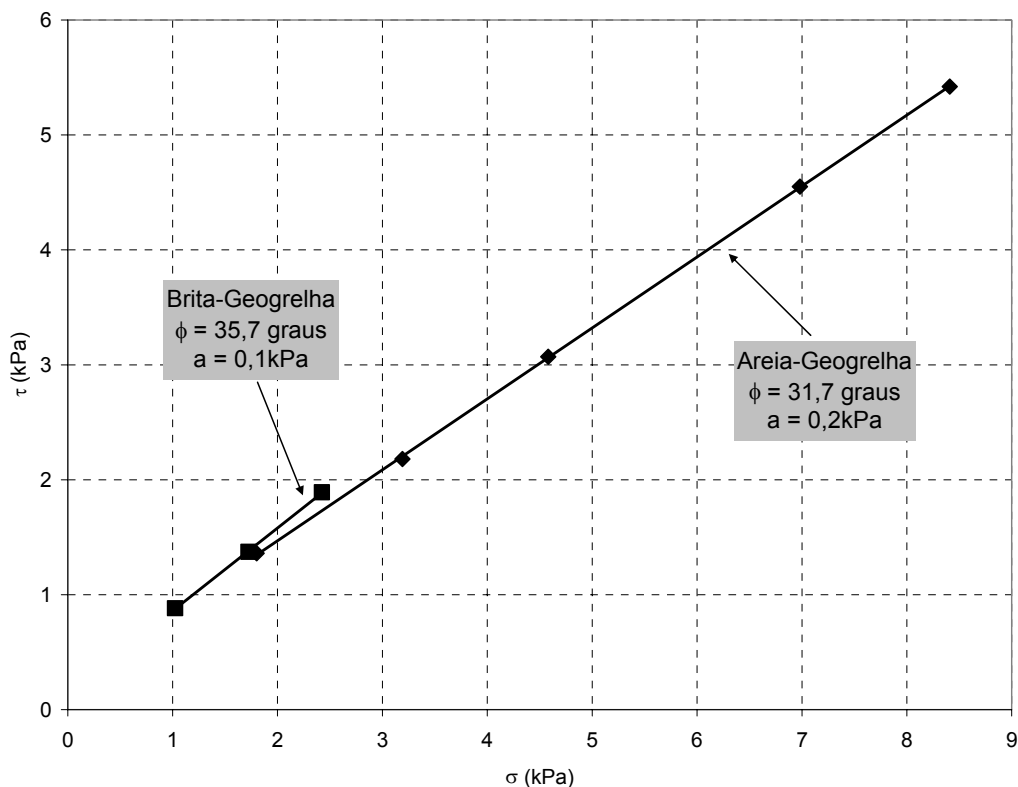


Figura 237 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha para densidade relativa de 15% em ensaios de cisalhamento direto convencional.

8.3.3. Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 52 e Figura 238 apresentam uma comparação entre os resultados das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana. A Figura 238 apresenta as curvas tensão cisalhante vs deslocamento para tensões confinantes de 2,4kPa para interface brita-geomembrana e 3,2kPa para interface areia-geomembrana.

Tabela 52 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana

Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
Brita (*)	1,0	28,5	0	1,02	0,59	0,59	30,5
	1,7	12,5	0	1,72	0,86	0,50	26,6
	2,4	8,0	0	2,42	1,23	0,51	27,0
Areia	3,2	0,5	0	3,19	0,66	0,21	11,6
	6,3	0,5	0	6,30	1,32	0,21	11,8
	8,4	0,8	0	8,41	1,82	0,22	12,2

(*) Tavares (2008)

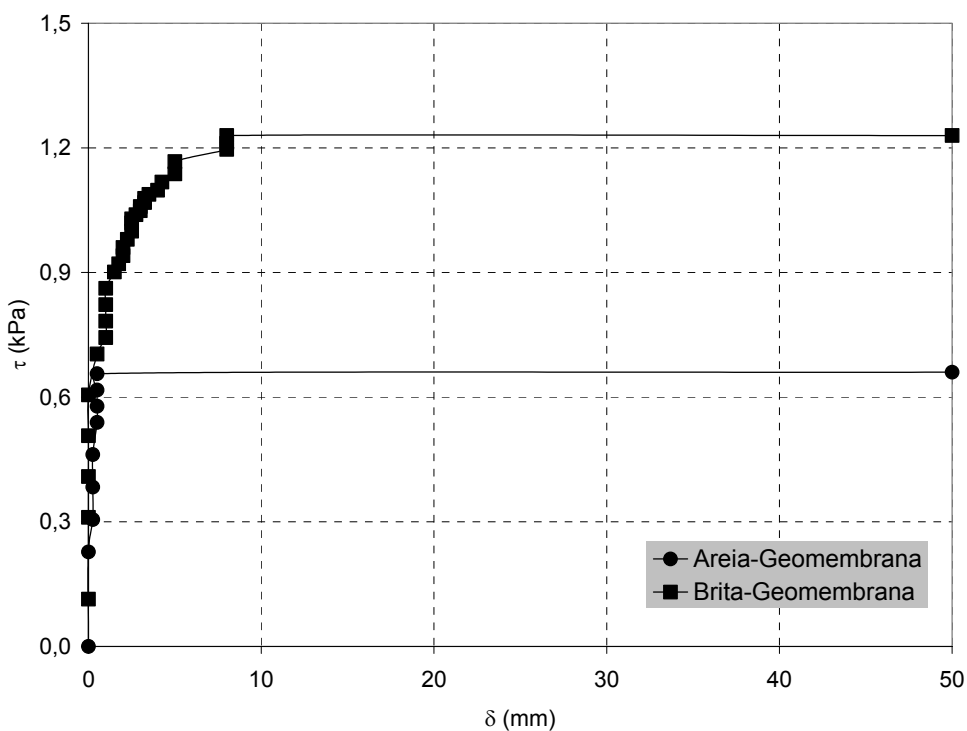


Figura 238 - Curvas deslocamento vs tensão cisalhante das interfaces areia-geomembrana (3,2kPa) e brita-geomembrana (2,4kPa) em ensaios de cisalhamento direto convencional.

De acordo com a Tabela 52, nota-se, que o aumento da tensão confinante corresponde a uma diminuição dos deslocamentos máximos na ruptura para a interface brita-geogrelha. Para a interface areia-geomembrana, os deslocamentos tendem a um aumento pouco expressivo, quando comparado com a magnitude de variação dos deslocamentos observados na interface brita-geomembrana.

A Figura 239 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 12,6°, para a interface areia-geomembrana, e adesão de 0,1kPa e ângulo de atrito de 24,7°, para a interface brita-geomembrana. Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo do ângulo de atrito de interface de 12,1°.

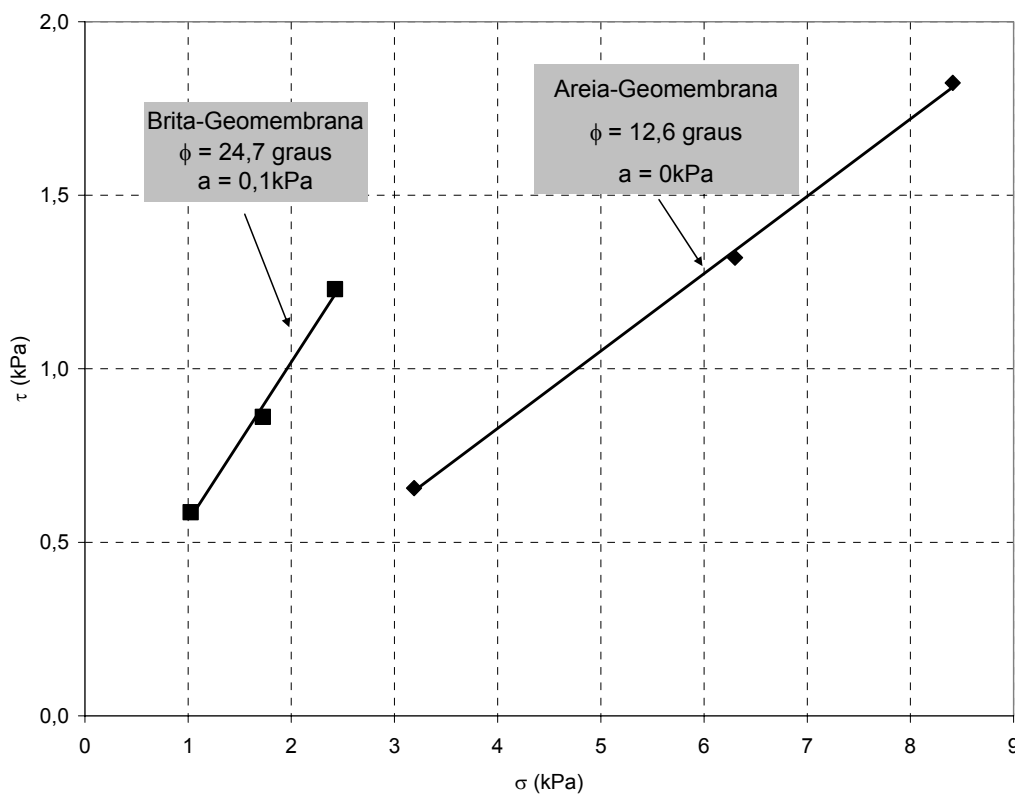
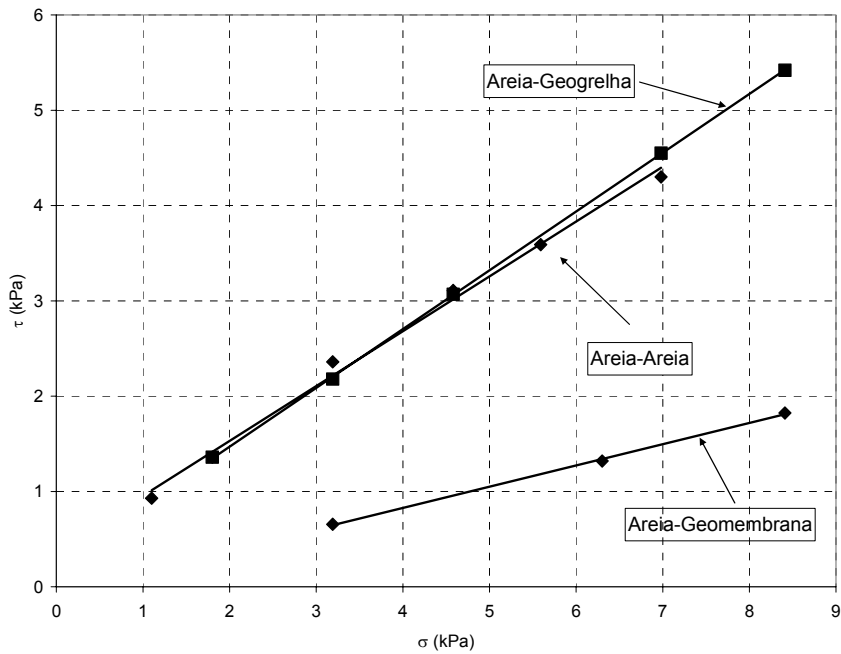


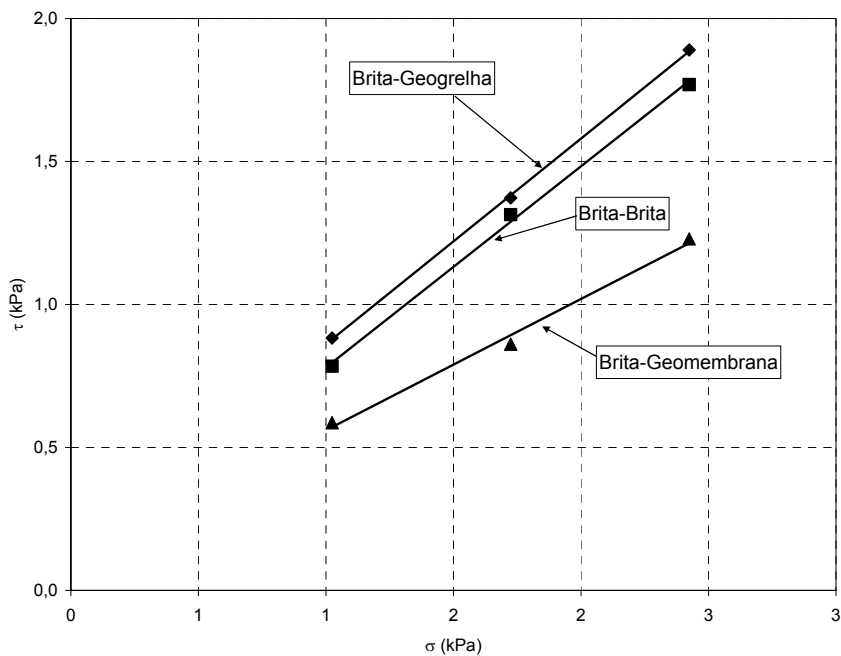
Figura 239 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15% em ensaios de cisalhamento direto convencional.

8.3.4. Eficiências de Interfaces

A Figura 240 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces areia-geossintético e brita-geossintético estudadas nesta pesquisa.



(a)



(b)

Figura 240 - Envoltórias de resistência obtidas de ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces com areia (a) e brita (b).

A Tabela 53 resume os parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ).

Tabela 53 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces obtidos de ensaios de cisalhamento direto convencional, $D_r = 15\%$

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
Ar x GG35	0,2	31,7	0,50	1,06
B0 x GG35	0,1	35,7	1,00	1,02
Ar x GMPL	0,0	12,6	0,00	0,42
B0 x GMPL	0,1	24,7	1,00	0,70

Os parâmetros de eficiência E_c e E_ϕ foram calculados considerando os parâmetros de resistência dos dois tipos de solo, obtidos dos ensaios de cisalhamento direto convencional.

De acordo com a Tabela 53, observa-se que o aumento da granulometria tem efeitos diferentes para as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana. Para a interface solo-geogrelha, o aumento da granulometria corresponde a uma diminuição pouco significativa de eficiência em termos de ângulo de atrito e um aumento considerável de eficiência em termos de coesão. Nas interfaces solo-geomembrana, observa-se o aumento de eficiência em termos de ângulo de atrito e de coesão com o aumento da granulometria.

8.4. Influência do Tipo de Geossintético

Para analisar a influência do tipo de geossintético, foram considerados ensaios representativos das interfaces solo-geossintético executados no equipamento de cisalhamento direto convencional sob tensão de confinamento de 3,2kPa para interfaces areia-geossintético e 2,4kPa para interfaces brita-geossintético.

Na Tabela 54, pode-se observar que, para cada tipo de interface, os maiores valores de ângulo de atrito secante na ruptura correspondem à geogrelha. As duas interfaces, geogrelha e geomembrana, apresentaram uma diferença de 22,7 e 11,0° no ângulo de atrito secante de ruptura, respectivamente. O aumento da

granulometria corresponde a uma diminuição dos deslocamentos da interface areia-geossintético, ao contrário da interface areia-geomembrana.

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 $D_r = 15\%$

Geossintético	Solo	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
Geogrelha	Areia	7,3	0	3,19	2,18	0,68	34,3
	Brita(*)	5,8	0	2,42	1,89	0,78	38,0
Geomembrana	Areia	0,5	0	3,19	0,66	0,21	11,6
	Brita(*)	8,0	0	2,42	1,23	0,51	27,0

(*) Tavares (2008)

Na Tabela 55, pode-se observar que, os maiores parâmetros de interface correspondem à geogrelha. As duas interfaces, geogrelha e geomembrana, apresentaram uma diferença de mais de 4 e 12,1° no ângulo de atrito de interface, respectivamente.

Tabela 55 - Comparação entre os parâmetros de resistência das interfaces obtidos em ensaios de cisalhamento direto convencional com $D_r = 15\%$

Geossintético	Solo	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)
Geogrelha	areia	31,7	0,2
	brita	35,7	0,1
Geomembrana	areia	12,6	0,0
	brita	24,7	0,1

8.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma análise das resistências de interfaces solo-geossintético obtidas em ensaios de cisalhamento direto convencional. Nestes estudos foram avaliados a influência do tipo de solo, tipo de geossintético e tensão confinante nos resultados dos ensaios. Desta forma, foram apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de rampa executados no programa experimental, incorporando parte do banco de dados disponível (Tavares, 2008).

O programa experimental envolveu ensaios de cisalhamento direto convencional em dois tipos de geossintéticos e areia com densidade relativa de 15%. Foram realizados ensaios de interface solo-solo, obtendo-se os parâmetros de resistência a baixas tensões normais, nas mesmas condições dos ensaios de interface. Com isso, foram obtidos os valores de eficiência da interface.

Analisou-se a influência da tensão confinante nas tensões cisalhantes de ruptura e concluiu-se que as diferentes interfaces apresentam comportamentos semelhantes.

Quanto à influência do tipo de solo, observou-se que o aumento da granulometria das interfaces corresponde a um aumento do ângulo de atrito. Verificou-se, também, que há uma redução da eficiência na interface solo-geogrelha e um aumento para a interface solo-geomembrana.

Por fim, com relação ao tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas com as interfaces solo-geogrelha. Isto pode ser explicado pelo tipo de estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência devido às características de sua superfície lisa e polida.

9. Resultados e Análises: Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

9.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e analisados os ensaios de cisalhamento direto inclinado realizados nesta pesquisa. Avalia-se a influência da tensão confinante, tipo de solo e tipo de geossintético.

Seguindo o procedimento dos capítulos anteriores as envoltórias de resistência das interfaces foram obtidas através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais distintas. Os ensaios são identificados pelo valor inicial da tensão normal atuante na superfície de ruptura, ou seja, no momento em que a plataforma de ensaio ainda se encontrava na posição horizontal.

É importante ressaltar que, para a obtenção das envoltórias de resistência, foram considerados os valores das tensões normal e cisalhante correspondentes à condição de ruptura.

A parcela da tensão confinante referente à camada de solo depende do tipo de material, espessura da camada de solo e densidade relativa. Desta forma, em todas as análises são especificadas as tensões confinantes consideradas.

Adotou-se a seguinte convenção: os ensaios com areia ou brita são identificados com as siglas Ar ou B0; os geossintéticos são identificados pelas siglas GMPL (geomembrana Polimanta), GG35 (geogrelha Fortrac 35); a densidade relativa é identificada pelo respectivo valor ($D_r = 15\%$ é indicada pelo valor 15). Por exemplo, a sigla AR15xGMPL corresponde ao ensaio da interface areia-geomembrana, com densidade relativa de 15%.

Os ensaios de cisalhamento direto inclinado foram realizados nas inclinações de 4,5; 9 e 18 graus, envolvendo interfaces solo-solo e solo-geossintético.

9.2. Influência da Tensão Confinante

A Tabela 56 apresenta os resultados mais representativos dos ensaios de cisalhamento direto inclinado em todas as interfaces ensaiadas com areia fofa ($D_r = 15\%$).

Tabela 56 - Influência da tensão confinante na tensão cisalhante de ruptura em areia ($D_r = 15\%$)

Interface	α (°)	τ (kPa)			$\Delta\tau$ (kPa)
		$\sigma_n = 1,8\text{kPa}$	$\sigma_n = 3,2\text{kPa}$	$\sigma_n = 5,0\text{kPa}$	
Ar x Ar	4,5	1,27	2,03	3,00	+1,73
Ar x GMPL		0,36	0,62	0,99	+0,63
Ar x Ar	9,0	1,29	1,90	2,69	+1,40
Ar x GMPL		0,28	0,50	0,78	+0,50
Ar x GG35		1,25	2,05	3,16	+1,91
Ar x Ar	18,0	1,03	1,66	2,52	+1,49
Ar x GG35		1,17	1,90	2,85	+1,68

Pode-se observar na Tabela 56 que, para as diferentes interfaces ensaiadas, a o aumento da tensão confinante acarretou comportamentos semelhantes no que concerne à tensão cisalhante de ruptura. Percebe-se que, independente da inclinação em que foi realizada a série de ensaios, a interface areia-geogrelha é a que sofre a maior influência do efeito do confinamento, apresentando os maiores incrementos de tensão cisalhante (diferença de tensão cisalhante de ruptura entre a maior e menor tensão normal).

A Figura 241 apresenta a influência da inclinação da plataforma de ensaio sobre a variação da tensão cisalhante. Observa-se que, independente do tipo de interface, ocorre uma redução deste incremento na medida em que a inclinação aumenta. A justificativa para este comportamento está associada à redução da tensão normal média atuando na interface, à medida que aumenta a inclinação da plataforma de ensaio.

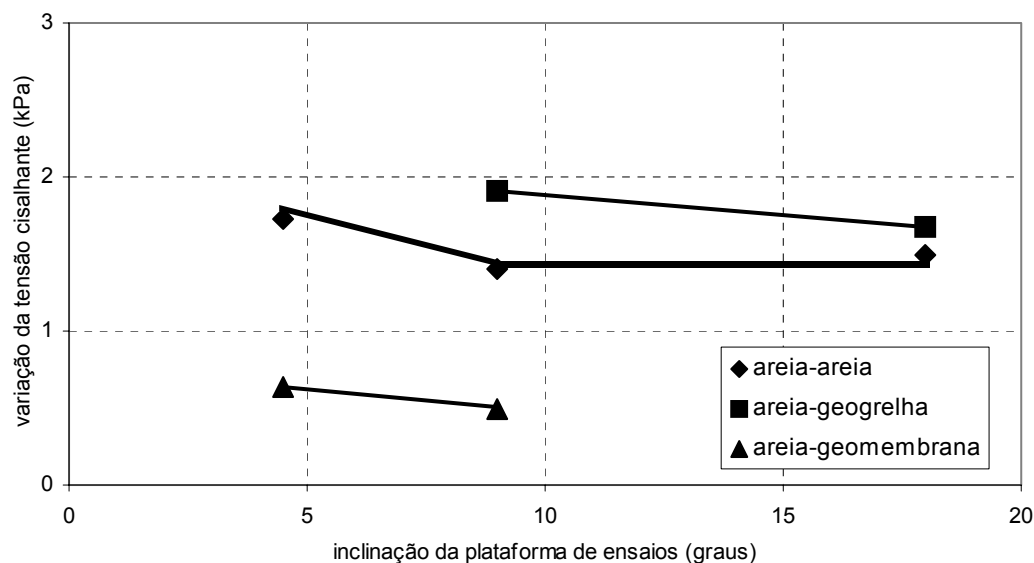


Figura 241 - Influência da inclinação no valor da tensão cisalhante de ruptura.

9.3. Influência do Tipo de Solo

9.3.1. Interface Solo-Solo

Para avaliar a influência do tipo de solo, foram comparados os ensaios de cisalhamento direto inclinado nas interfaces areia-areia e brita-brita (Tavares, 2008), com densidade relativa de 15%, para as inclinações de 9 e 18°. A Tabela 57 apresenta os resultados dos ensaios nas duas interfaces.

Tabela 57 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-areia e brita-brita ($D_r = 15\%$)

α (°)	Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
9,0	areia	1,8	11,5	1,78	1,29	0,72	35,9
		3,2	7,5	3,15	1,90	0,60	31,1
		5,0	8,5	4,95	2,69	0,54	28,5
	brita (*)	1,0	7,8	1,01	0,88	0,87	41,0
		1,7	6,8	1,70	1,46	0,86	40,7
		2,4	11,0	2,39	2,00	0,84	40,0

(*) Tavares (2008)

Tabela 57 (cont.) - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-areia e brita-brita ($D_r = 15\%$)

α (°)	Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
18,0	areia	1,8	8,8	1,71	1,03	0,60	31,0
		3,2	5,5	3,03	1,66	0,55	28,7
		5,0	5,6	4,76	2,52	0,53	27,9
	brita (*)	1,0	6,0	0,97	0,84	0,86	40,7
		1,7	11,8	1,64	1,35	0,83	39,7
		2,4	15,0	2,31	1,93	0,84	40,0

(*) Tavares (2008)

As Figuras 242 e 243 apresentam os resultados gráficos de cada ensaio. Pode-se observar que o comportamento da brita é diferente da areia. Independente da inclinação da plataforma de ensaios, os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante, no caso da interface areia-areia, enquanto que tendem a aumentar, na interface brita-brita.

A justificativa para a ocorrência de deslocamentos maiores na brita pode ser explicada pela possibilidade de rearranjo e maior imbricamento dos grãos da brita ao longo do ensaio.

Em termos de tensão cisalhante de ruptura, os resultados indicam que o aumento da inclinação da plataforma provoca uma redução dos valores de tensão devido à diminuição da tensão média atuante na interface.

A Figura 244 exibe as envoltórias de resistência da areia e da brita com densidade relativa de 15%, para inclinação de 9°. Os parâmetros obtidos foram: $c' = 0,5$ kPa e $\phi' = 23,8^\circ$ para a interface areia-areia e $c' = 0,1$ kPa e $\phi' = 38,8^\circ$ para a interface brita-brita.

A Figura 245 exibe as envoltórias de resistência da areia e da brita com densidade relativa de 15%, para inclinação $\alpha = 18^\circ$. Os parâmetros obtidos foram: $c' = 0,2$ kPa e ângulo de atrito de $26,1^\circ$ para a interface areia-areia e $c' = 0$ e ângulo de atrito de $39,3^\circ$ para a interface brita-brita.

Pode-se concluir que, para as duas inclinações, o aumento da granulometria do solo correspondeu a um acréscimo de 15 a 16° no ângulo de atrito.

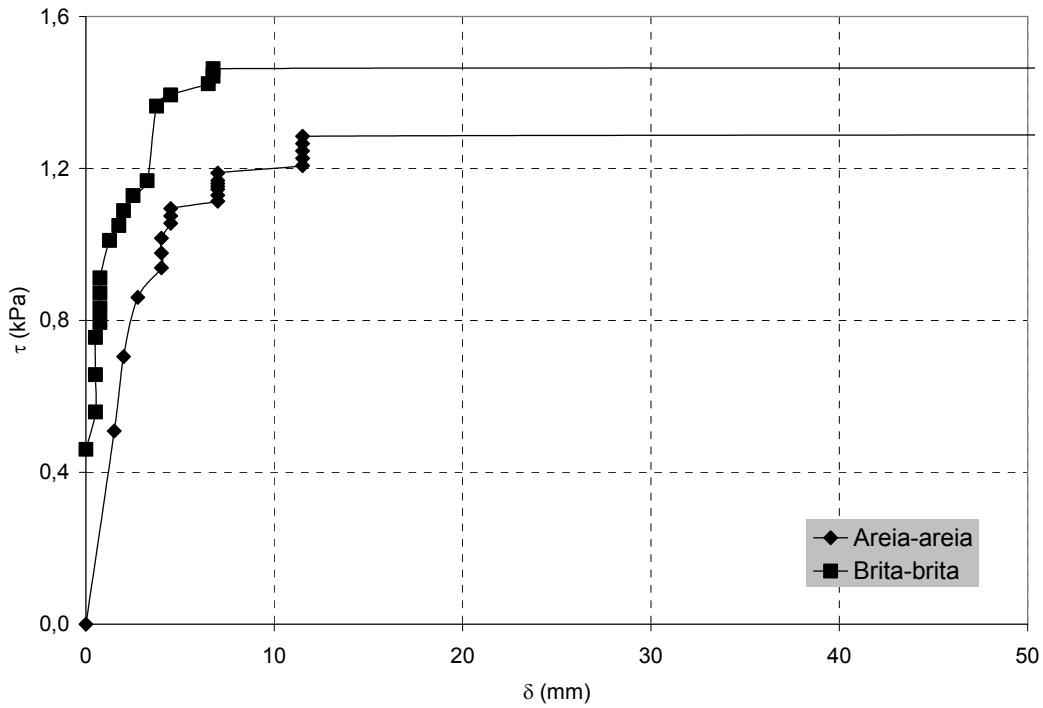


Figura 242 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma de ensaios inclinada a 9°.

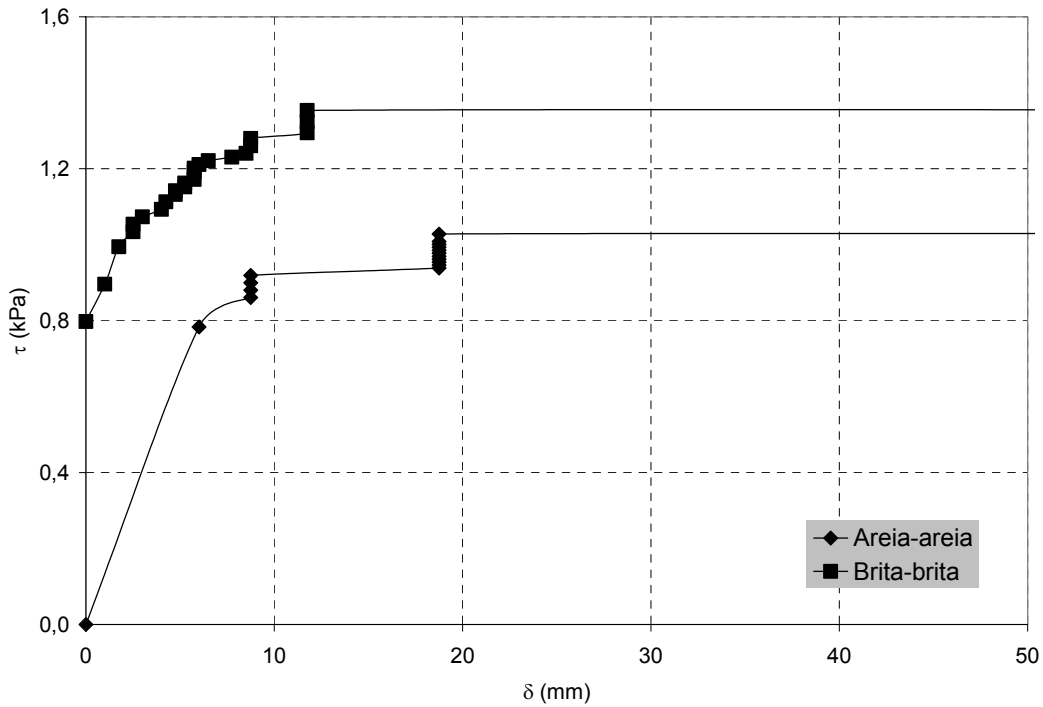


Figura 243 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-areia e brita-brita para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma de ensaios inclinada a 18°.

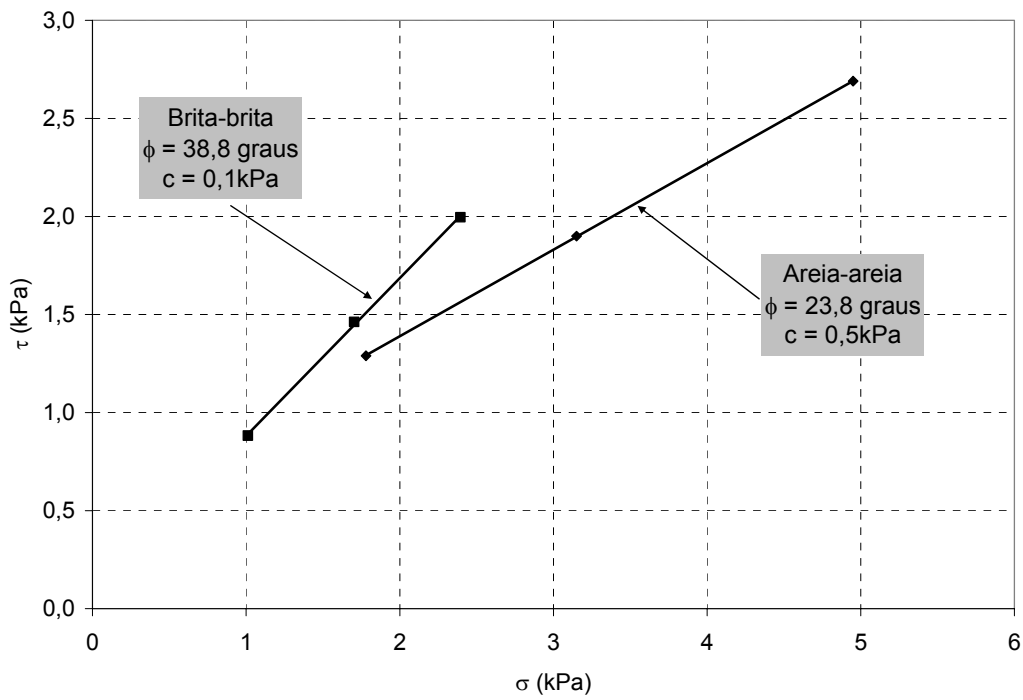


Figura 244 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.

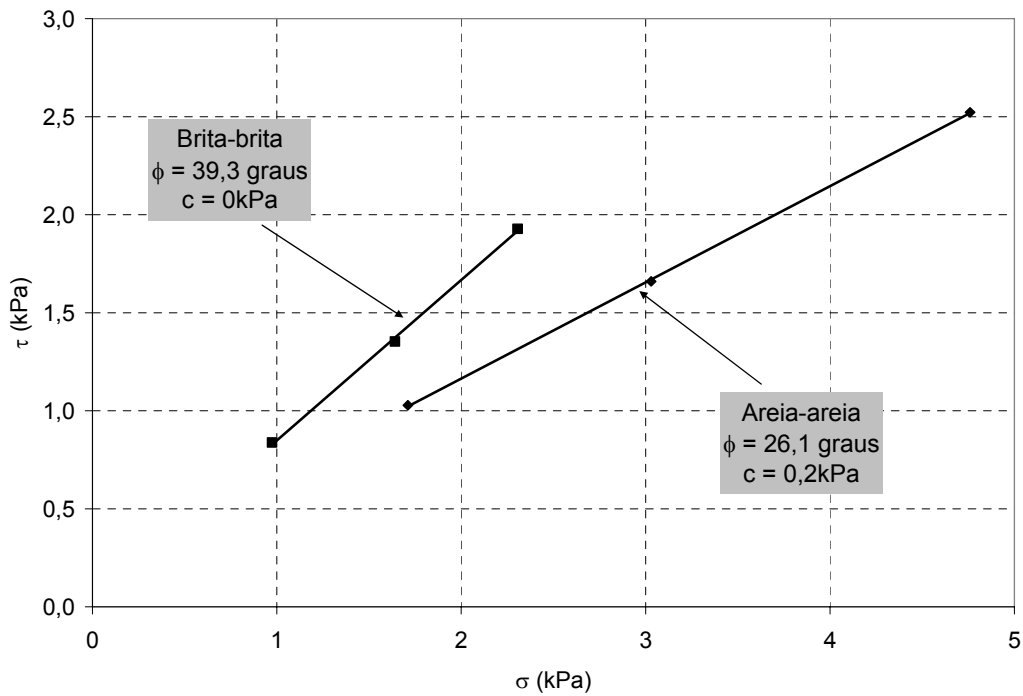


Figura 245 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 18°.

Observa-se, entretanto, que os valores de ângulo de atrito obtidos para a inclinação de 18° são um pouco superiores aos valores obtidos para a inclinação de 9°. Isto pode estar associado à menor uniformidade das tensões normais no instante da ruptura no caso da inclinação de 18°, quando comparada com a de 9°.

Os resultados obtidos com a areia na configuração RP50R-10 (Rampa, caixa de 50, Retangular), inclinada a 18°, são apresentados na Figura 246. Constata-se que os parâmetros obtidos estão bem próximos dos encontrados com a configuração RP25Q-10 (Rampa, caixa de 25, Quadrada). Esta foi a configuração utilizada em todos os ensaios de interface (areia-areia ou areia-geossintético) reportados neste capítulo. Pode-se supor, portanto, que a configuração de ensaio não interferiu nos resultados.

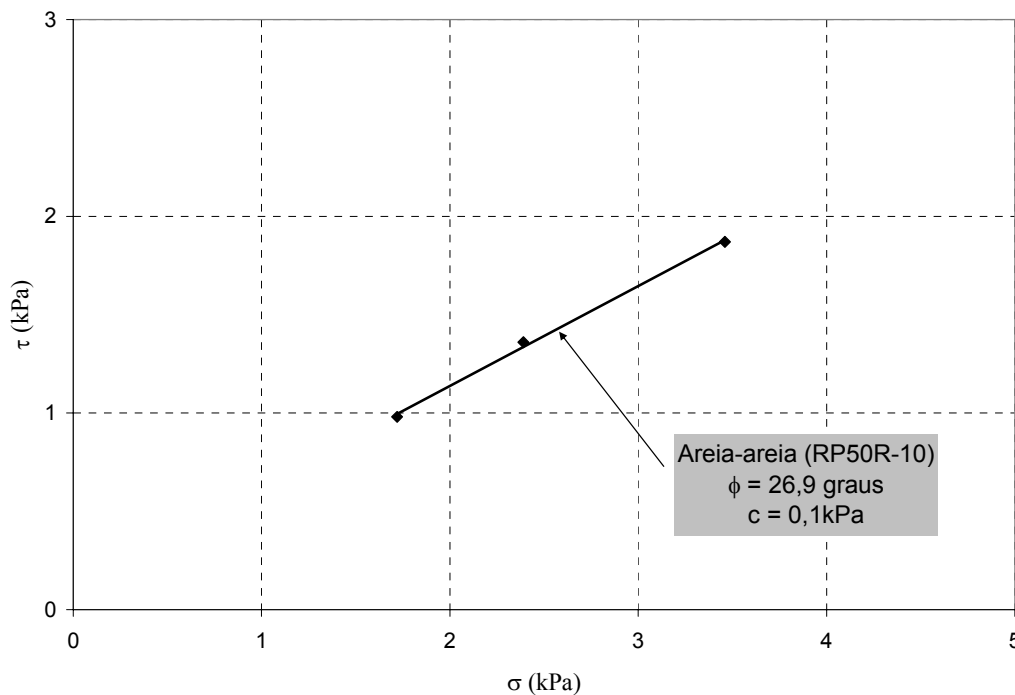


Figura 246 - Envoltória de ruptura da interface areia-areia para densidade relativa de 15%, plataforma inclinada a 18° e empregando a configuração RP50R-10.

A hipótese mais provável para explicar este comportamento pode estar associada ao método de realização do ensaio e ao sistema de basculamento do equipamento. O procedimento de ensaio de cisalhamento direto inclinado é dividido em duas fases. Na primeira etapa, as caixas de ensaio são travadas com o auxílio de grampos tipo C (Figura 163) e basculadas até um ângulo pré-

determinado. A segunda etapa corresponde ao cisalhamento propriamente dito. O basculamento é feito com a talha (Figura 93), que pode provocar uma pequena vibração na estrutura. No ensaio de rampa, o efeito da vibração é mínimo, pois o basculamento é procedido por incrementos de $1,0^\circ$. Entretanto, no ensaio de cisalhamento direto inclinado, a plataforma de ensaio é basculada de uma só vez até o ângulo de ensaio, o que pode majorar o efeito das pequenas vibrações. Este efeito pode se traduzir num aumento da densidade do solo, com conseqüente aumento de resistência.

9.3.2. Interface Solo-Geogrelha

Para avaliar a influência do tipo de solo, foram comparados os ensaios de cisalhamento direto inclinado nas interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha com densidade relativa de 15%, para as inclinações de 9 e 18° .

A Tabela 58 e as Figuras 247 e 248 apresentam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado nas duas interfaces.

Pode-se observar que o comportamento da interface brita-geogrelha é similar ao da interface areia-geogrelha. Para a inclinação da plataforma de ensaios a 9° , as duas interfaces tendem a aumentar os deslocamentos com o aumento da tensão confinante. Para a inclinação de 18° , verifica-se que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante.

Em termos de tensão cisalhante de ruptura, os resultados indicam que o aumento da inclinação da plataforma provoca uma redução dos valores de tensão devido à diminuição da tensão média atuante na interface.

Tabela 58 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha ($D_r = 15\%$).

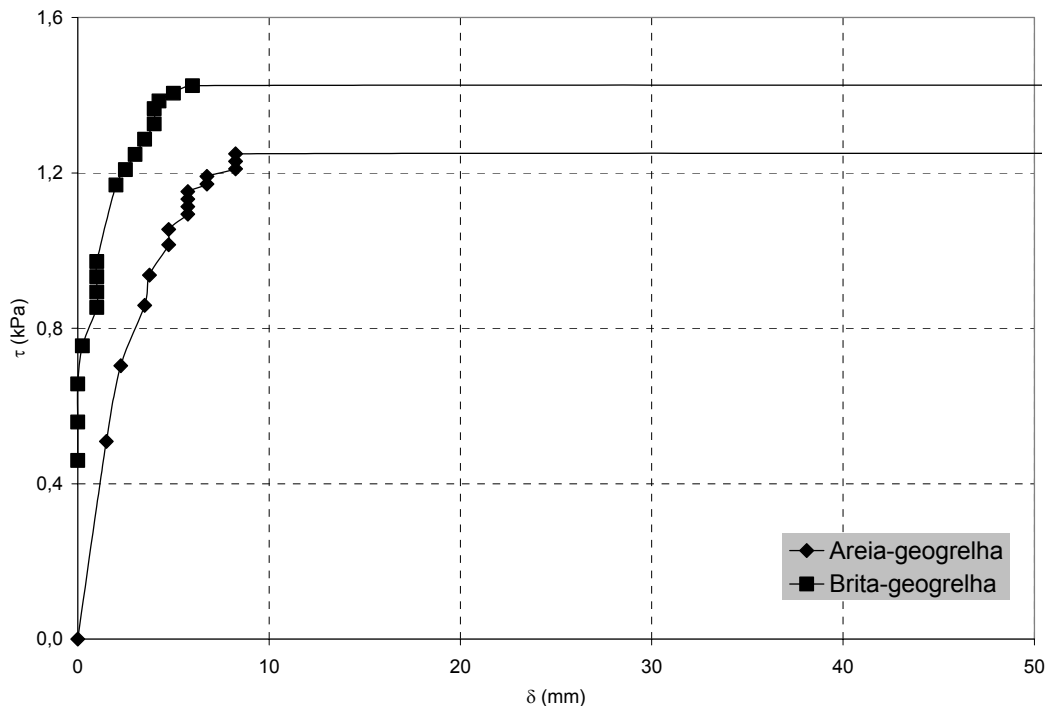
α ($^\circ$)	Solo	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
9,0	areia	1,8	8,3	1,78	1,25	0,70	35,1
		3,2	7,5	3,15	2,05	0,65	33,1
		5,0	9,3	4,95	3,16	0,64	32,6

Tabela 58 (cont.) - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geogrelha e brita-geogrelha ($D_r = 15\%$).

α ($^\circ$)	Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				$\sigma_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}$ (kPa)	$\tau_{rup.}/\sigma_{rup.}$	
9,0	brita (*)	1,0	4,5	1,01	0,74	0,74	36,5
		1,7	6,0	1,70	1,42	0,84	40,0
		2,4	8,3	2,39	2,10	0,88	41,3
18,0	areia	1,8	9,5	1,71	1,17	0,68	34,4
		3,2	8,3	3,03	1,90	0,63	32,1
		5,0	4,3	4,76	2,85	0,60	30,9
	brita (*)	1,0	6,3	0,97	0,88	0,90	41,3
		1,7	4,0	1,64	1,43	0,87	41,0
		2,4	5,5	2,31	1,77	0,77	37,6

(*) Tavares (2008)

A Figura 249 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a inclinação de 9° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: $c=0,2\text{kPa}$ e $\phi=31,1^\circ$ para a interface areia-areia e $c=0$ e $\phi=44,4^\circ$ para a interface brita-brita.

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° .

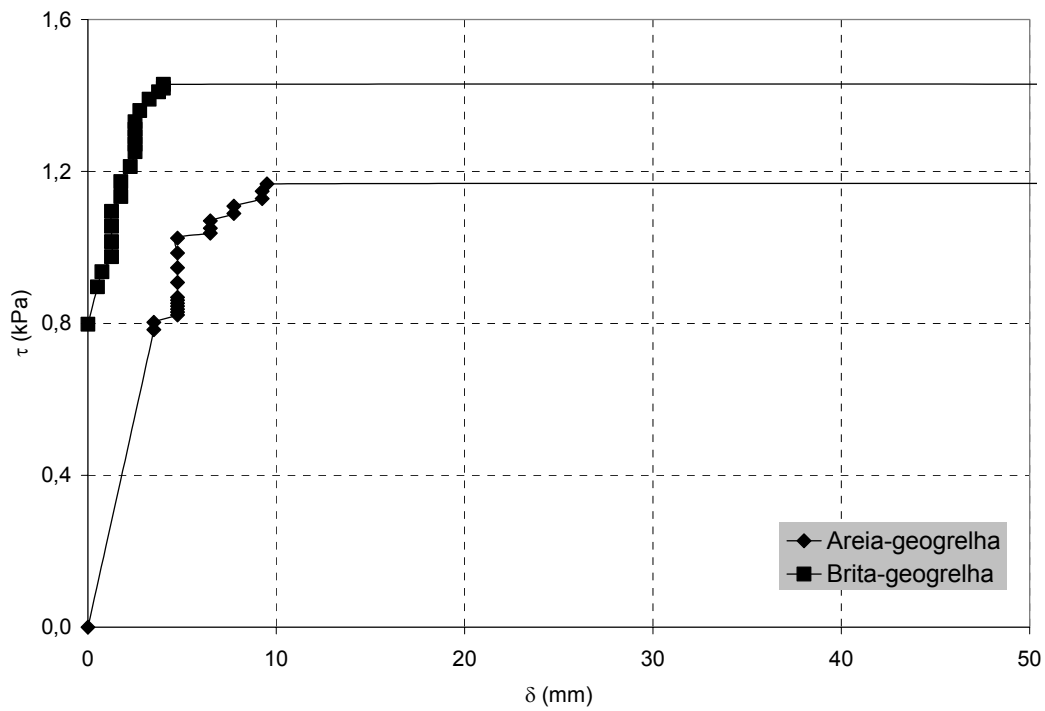


Figura 248 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geogrelha e brita-geogrelha para tensão confinante de 1,8kPa com a plataforma inclinada a 18°.

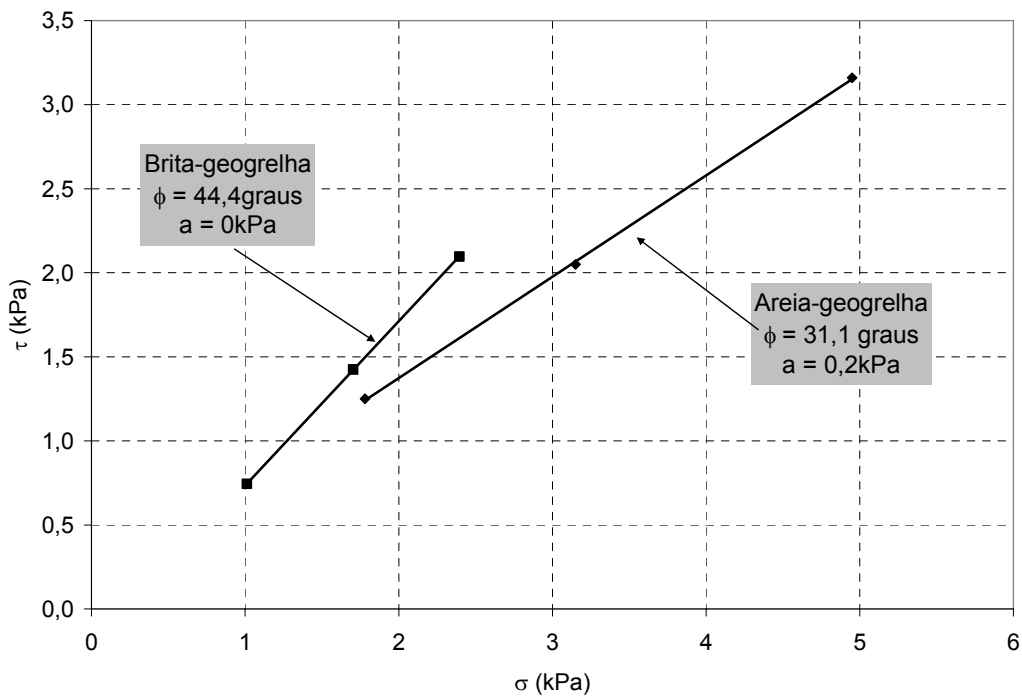


Figura 249 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.

A Figura 250 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia e brita-brita para a inclinação de 9° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de $28,8^\circ$ para a interface areia-areia e coesão de 0,3kPa e ângulo de atrito de $33,9^\circ$ para a interface brita-brita.

Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de $13,3^\circ$ no ângulo de atrito.

Diferentemente do observado nos resultados das interfaces solo-solo, não se percebeu um efeito mesmo que pequeno da vibração do sistema de basculamento do equipamento.

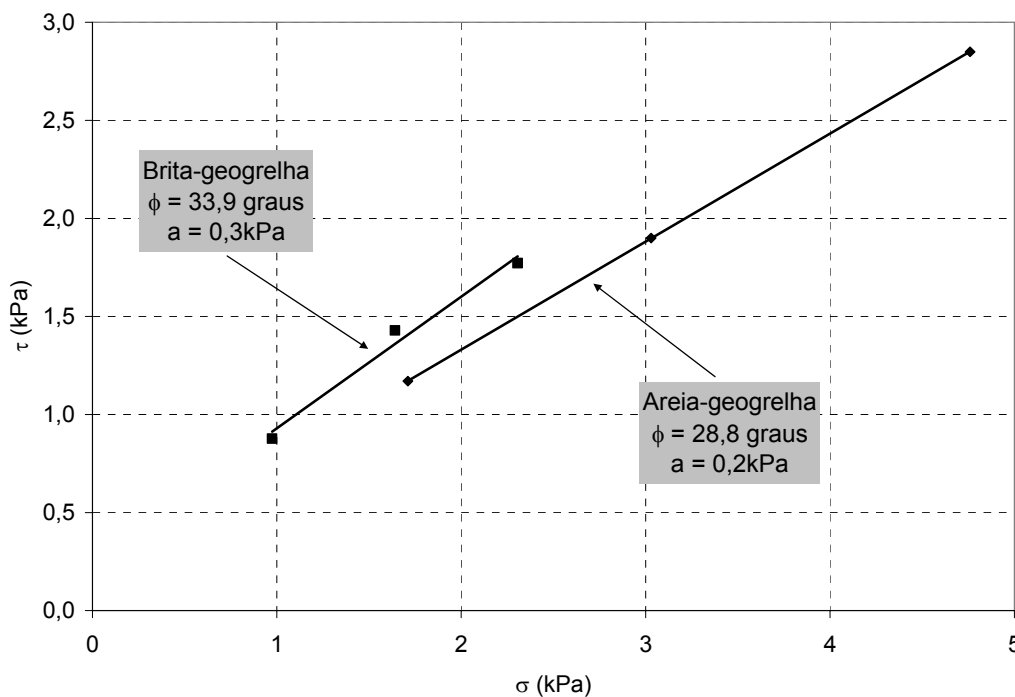


Figura 250 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-areia e brita-brita para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 18° .

9.3.3. Interface Solo-Geomembrana

Da mesma forma que nos itens anteriores, para avaliar a influência do tipo de solo foram comparados os ensaios de cisalhamento direto inclinado nas interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana, com densidade relativa de 15%, para as inclinações de $4,5^\circ$ e 9° . A geomembrana utilizada neste estudo foi a Polimanta da Engepol.

A Tabela 59 e Figuras 251 e 252 apresentam os resultados dos ensaios de rampa nas duas interfaces.

Tabela 59 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto inclinado para as interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana ($D_r = 15\%$).

α (°)	Solo	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
					σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
4,5	areia	1,8	1,3	4,5	1,79	0,36	0,20	11,4
		3,2	0,3	4,5	3,18	0,62	0,20	11,1
		5,0	0,3	4,5	4,99	0,99	0,20	11,2
	brita (*)	1,0	45,8	4,5	1,02	0,58	0,57	29,7
		1,7	15,3	4,5	1,72	0,82	0,48	25,6
		2,4	31,8	4,5	2,42	1,22	0,51	27,0
9,0	areia	1,8	0	9	1,78	0,28	0,16	9,0
		3,2	0	9	3,15	0,50	0,16	9,0
		5,0	0	9	4,95	0,78	0,16	9,0
	brita (*)	1,0	31,5	9	1,01	0,51	0,50	26,6
		1,7	22,5	9	1,70	0,82	0,48	25,6
		2,4	27,8	9	2,39	1,09	0,46	24,7

(*) Tavares (2008)

Pode-se observar que o comportamento da interface brita-geomembrana é parecido com o da interface areia-geomembrana. Observa-se que, independente da inclinação da plataforma de ensaios, os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante. A exceção é a interface areia-geomembrana, que exibe uma ruptura brusca, ou seja, com deslocamento praticamente nulo.

Entretanto a magnitude dos deslocamentos das interfaces brita-geomembrana é bem maior do que a areia-geomembrana. A justificativa para a ocorrência de maiores deslocamentos na interface brita-geomembrana pode ser relacionada com a possibilidade de um maior rearranjo ao longo do ensaio.

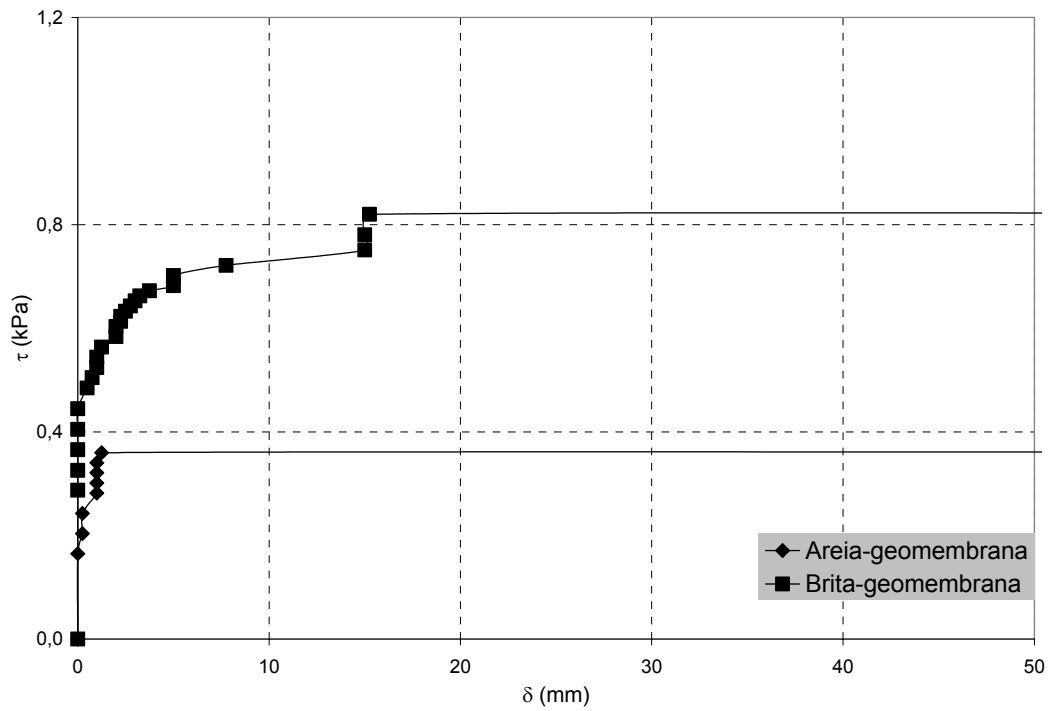


Figura 251 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geomembrana e brita-geomembrana para $\sigma = 1,8 \text{ kPa}$ e plataforma inclinada a $4,5^\circ$.

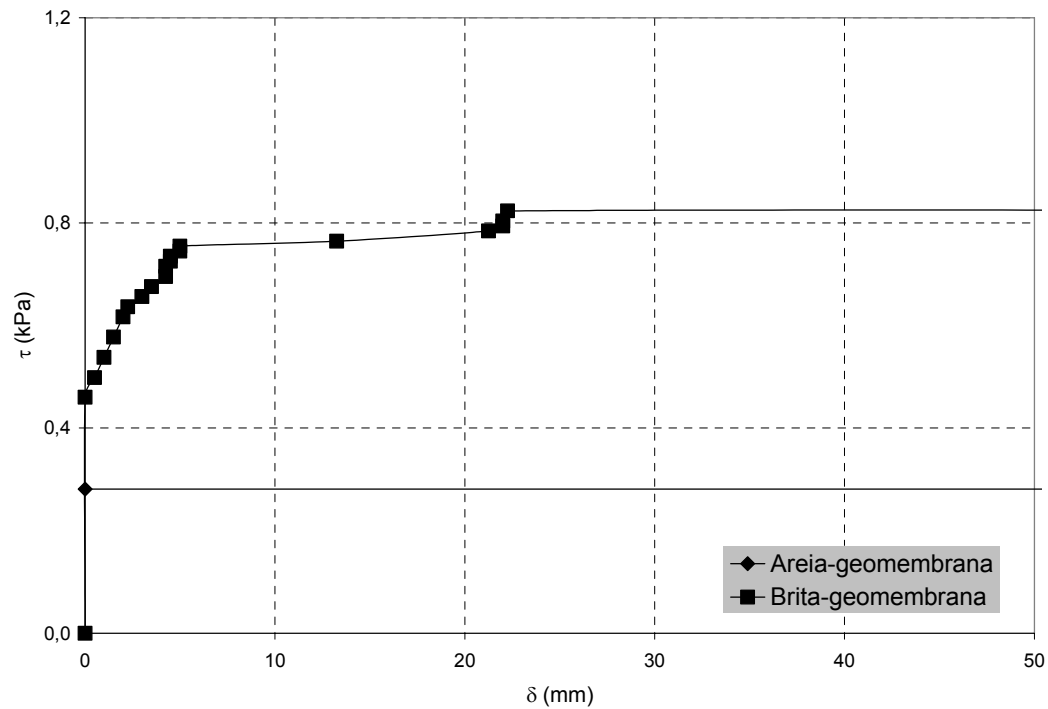


Figura 252 - Curva deslocamento vs tensão cisalhante para interface areia-geomembrana e brita-geomembrana para $\sigma = 1,8 \text{ kPa}$ e plataforma inclinada a 9° .

Em termos de tensão cisalhante de ruptura, os resultados indicam que o aumento da inclinação da plataforma provoca uma redução dos valores de tensão devido à diminuição da tensão média atuante na interface.

A Figura 253 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a inclinação de 4,5° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: $a=0$ e $\phi_{sg}=11,1^\circ$ para a interface areia-geomembrana e $a=0,1$ kPa e $\phi_{sg}=24,8^\circ$ para a interface brita-geomembrana.

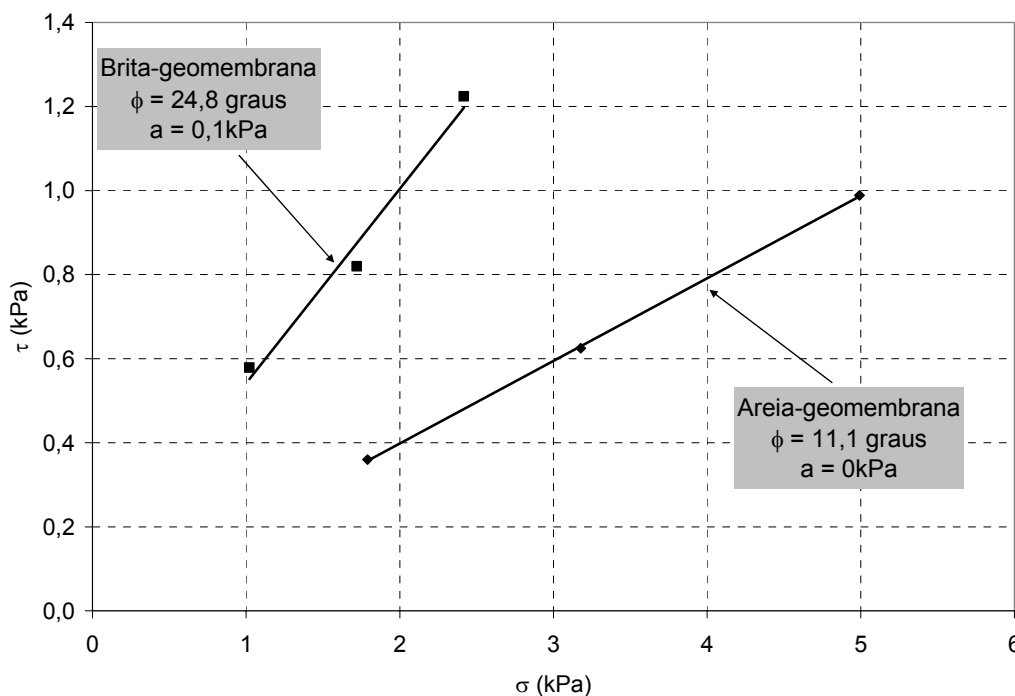


Figura 253 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 4,5

A Figura 254 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para a inclinação de 9° na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: $a=0$ e $\phi_{sg}=9^\circ$ para a interface areia-geomembrana e $a=0,1$ kPa e $\phi_{sg}=22,9^\circ$ para a interface brita-geomembrana.

Assim, pode-se concluir que o aumento da granulometria do solo corresponde a um acréscimo de cerca de 14° no ângulo de atrito. É importante

frisar que os ensaios utilizados para determinar a envoltória de ruptura da interface areia-geomembrana apresentaram uma ruptura similar à dos ensaios de rampa e, com isso, os parâmetros de interface foram similares.

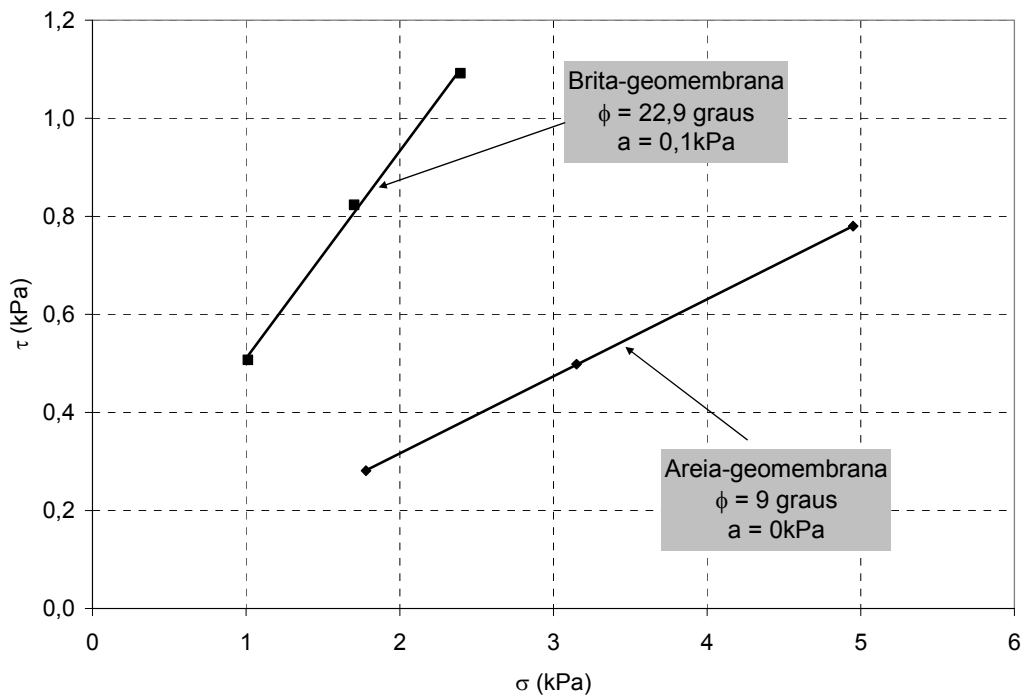


Figura 254 - Envoltórias de ruptura das interfaces areia-geomembrana e brita-geomembrana para densidade relativa de 15%, para plataforma inclinada a 9°.

9.3.4. Eficiências de Interfaces

As Figura 255, 256 e 257 apresentam as envoltórias de resistência das interfaces areia-geossintético e brita-geossintético estudadas neste capítulo.

A Tabela 60 resume os parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ).

Tabela 60 - Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces.

α (°)	Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)	E_c	E_ϕ
4,5	Ar x GMPL	0	11,1	0	0,39
	B0 x GMPL	0,1	24,8	~	~
9,0	Ar x GMPL	0	9	0	0,38
	B0 x GMPL	0,1	22,9	1	0,59
	Ar x GG35	0,2	31,1	1	1,31
	B0 x GG35	0	44,4	0	1,13
18,0	Ar x GG35	0,2	28,8	1	1,10
	B0 x GG35	0,3	33,9	0	0,86

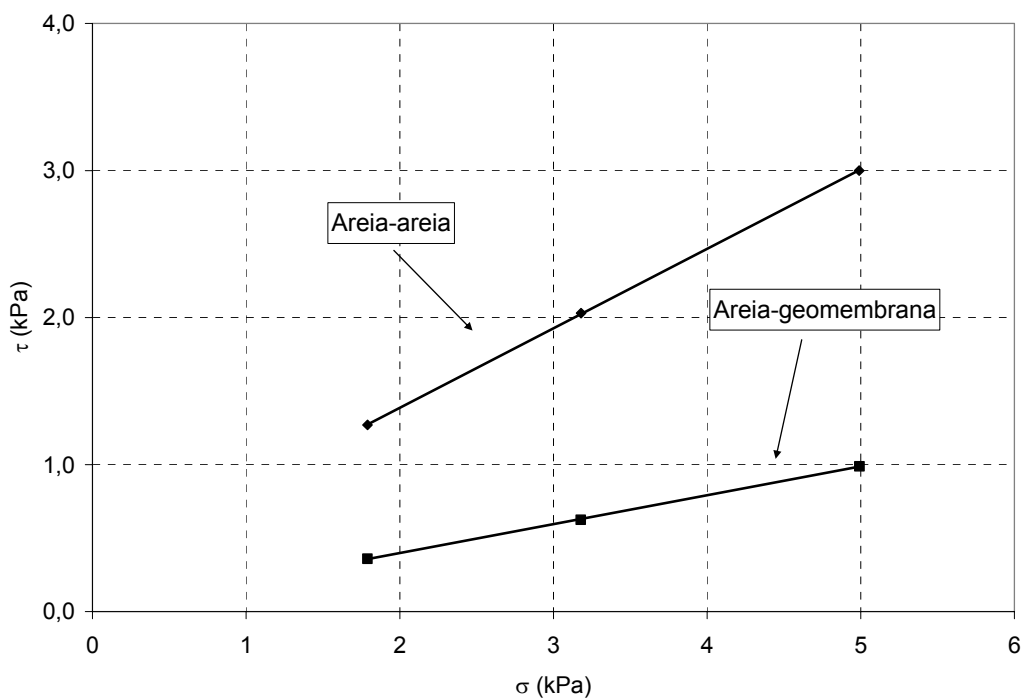
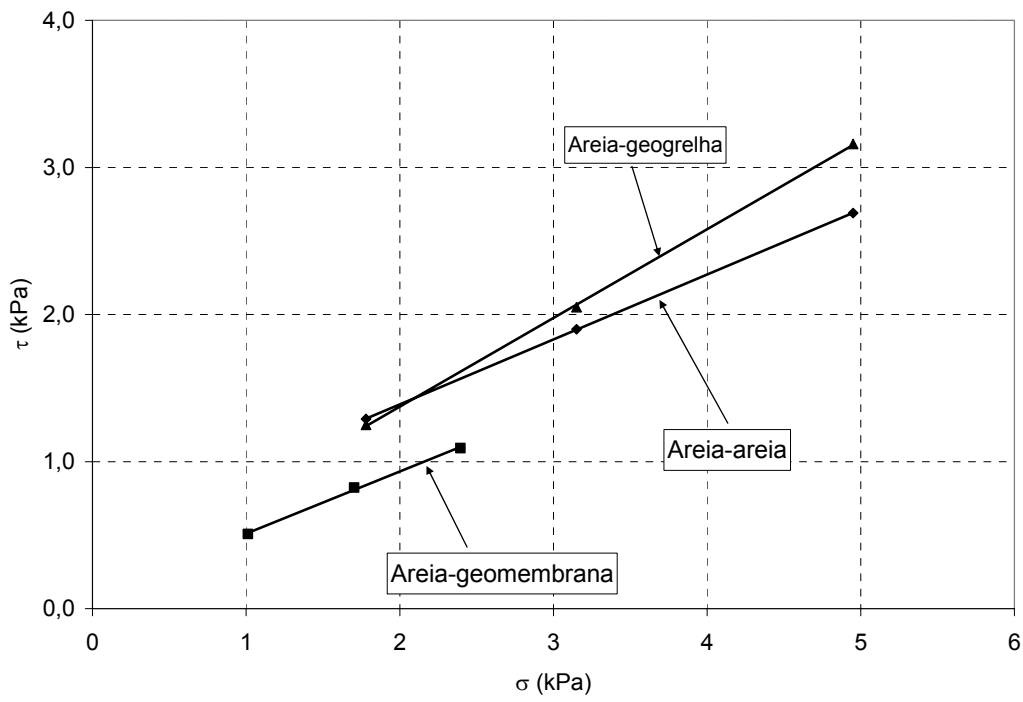
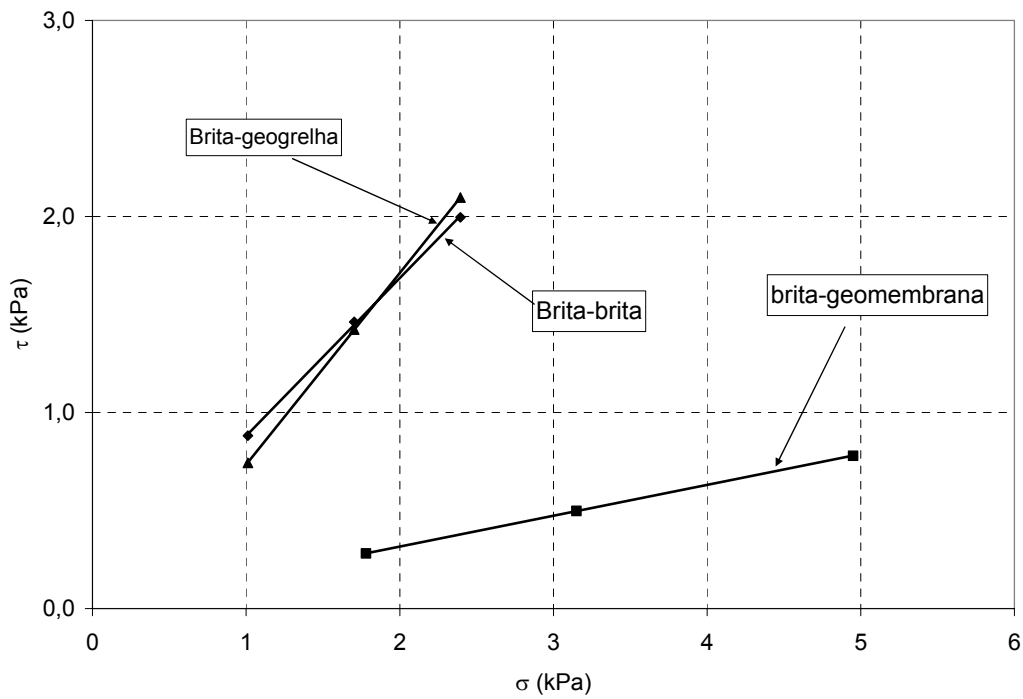


Figura 255 - Envoltórias de resistência das interfaces com areia obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 4,5°.

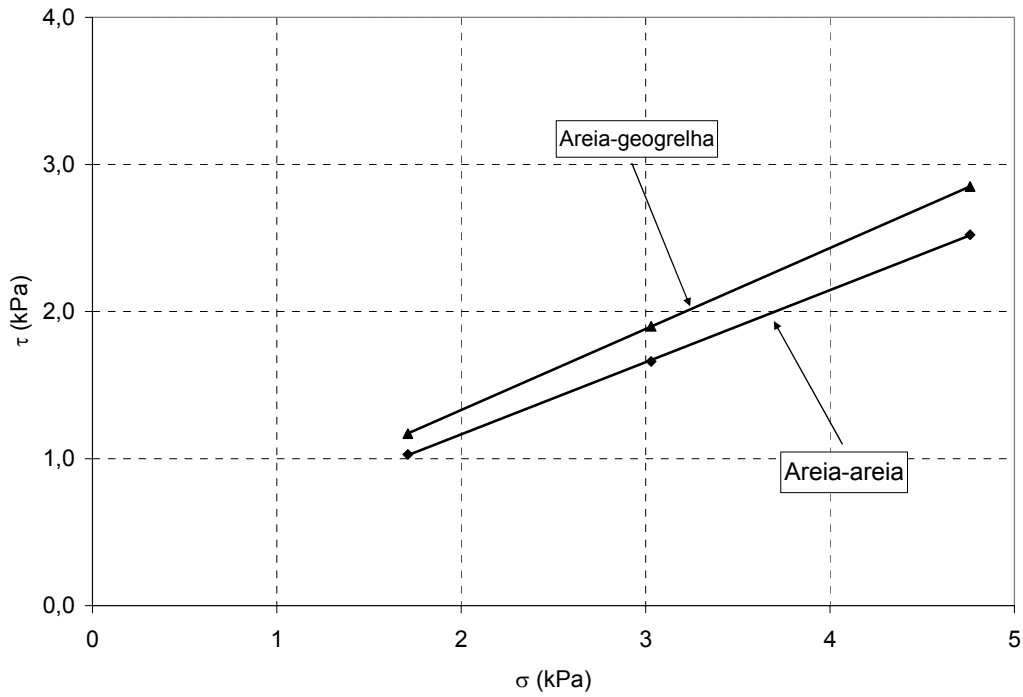


(a)

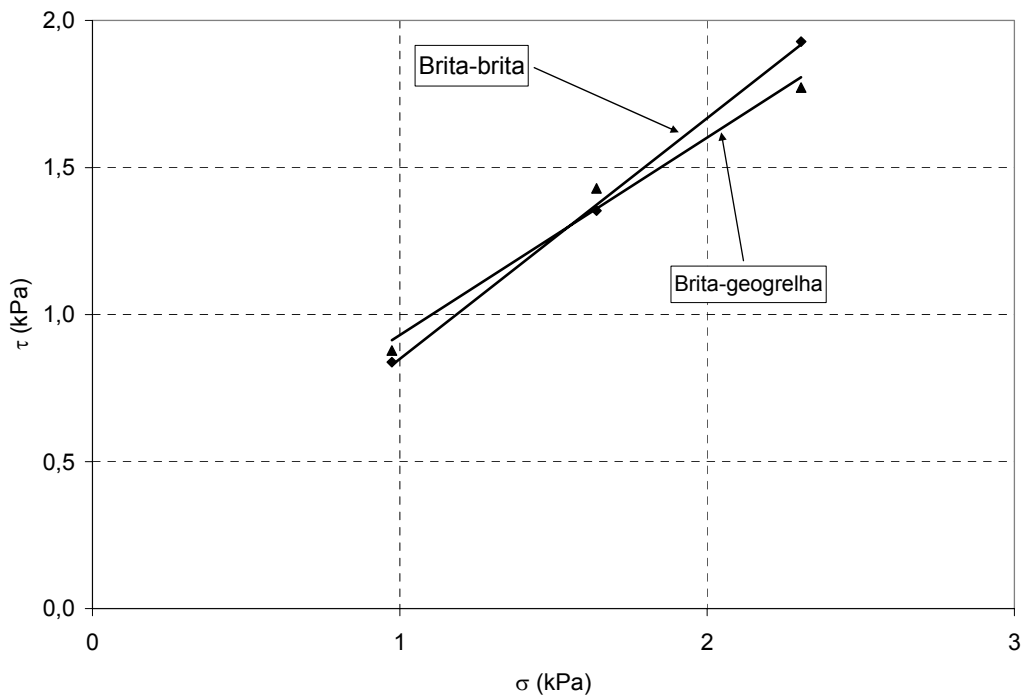


(b)

Figura 256 - Envoltórias de resistência das interfaces com (a) areia e (b) brita, obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 9°.



(a)



(b)

Figura 257 - Envoltórias de resistência das interfaces com (a) areia e (b) brita, obtidas de ensaios de cisalhamento direto inclinado a 18° .

Na Tabela 60, observa-se que o aumento da granulometria tem efeitos diferentes para as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana. Para a interface solo-geogrelha a 9° de inclinação, o aumento da granulometria corresponde a uma redução de eficiência em termos de ângulo de atrito e coesão. Nas interfaces solo-geomembrana, nota-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento de eficiência de ϕ_{sg}' e a' . Para os ensaios com 18° de inclinação, caso das interfaces solo-geogrelha, nota-se que o aumento da granulometria corresponde a uma redução de eficiência dos parâmetros de resistência.

Conclui-se, de uma forma geral, que o aumento da granulometria, independente do ângulo em que foi realizado o ensaio, corresponde a um aumento de eficiência de interface para as interfaces solo-geomembrana e a uma redução de eficiência de interface para as interfaces solo-geogrelha.

9.4. Influência do Tipo de Geossintético

Para analisar a influência do tipo de geossintético, foram considerados ensaios representativos das interfaces solo-geossintético executados no equipamento de cisalhamento direto inclinado sob tensão de confinamento intermediária (1,8kPa). A Tabela 61 apresenta os resultados dos ensaios. A geomembrana utilizada foi a Polimanta.

Tabela 61 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para $D_r = 15\%$ e tensão confinante de 1,8kPa

Geossintético	Solo	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
Geogrelha	Areia	8,3	9	1,78	1,25	0,70	35,1
	Brita(*)	6,0	9	1,70	1,42	0,84	40,0
	Areia	9,5	18	1,71	1,17	0,68	34,4
	Brita(*)	4,0	18	1,64	1,43	0,87	41,0
Geomembrana	Areia	1,3	4,5	1,79	0,36	0,20	11,4
	Brita(*)	15,3	4,5	1,72	0,82	0,48	25,6
	Areia	0	9	1,78	0,28	0,16	9,0
	Brita(*)	22,5	9	1,70	0,82	0,48	25,6

(*) Tavares (2008)

Na Tabela 61, pode-se observar que, para cada tipo de interface, os maiores valores de ângulo de atrito secante na ruptura correspondem à geogrelha. As duas interfaces (geogrelha e geomembrana) apresentaram uma diferença superior a 5 graus no valor de ϕ_{sec} , para qualquer inclinação de ensaio. Os maiores valores observados são para a interface brita-geomembrana, cerca de 16,6°.

Os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da granulometria para as interfaces solo-geogrelha, independente do ângulo de inclinação do ensaio. Entretanto, é observado um comportamento distinto para as interfaces solo-geomembrana. Enquanto a ruptura das interfaces areia-geomembrana tende a ser brusca, ou com pequenos deslocamentos, a interface brita-geogrelha apresenta deslocamentos maiores na ruptura. Uma explicação para isso pode estar associada à capacidade que a brita tem de modificar a textura da superfície da geomembrana através de ranhuras ou danos que aumentam o imbricamento. Estes pontos tendem a dificultar ou retardar a ruptura da interface, além de aumentar a resistência final.

Na Tabela 62, observa-se que a geogrelha tem os maiores parâmetros de interface. Houve uma diferença de mais de 20° no ângulo de atrito das duas interfaces (geogrelha e geomembrana), nos ensaios com 9° de inclinação. Esse comportamento deve-se às características superficiais do geossintético. A geomembrana apresenta uma superfície lisa e polida, sem imbricamento com os grãos de solo, e por consequência, com menor resistência. Por sua vez, a geogrelha tem uma área aberta considerável, propiciando o contato solo-solo, além das tiras longitudinais e transversais apresentarem uma superfície rugosa.

Tabela 62 - Parâmetros de resistência obtidos para cada interface, com $D_r = 15\%$

α (°)	Geossintético	Solo	a (kPa)	ϕ_{sg} (graus)
4,5	Geomembrana	areia	0	11,1
		brita	0,1	24,8
9	Geomembrana	areia	0	9
		brita	0,1	22,9
	Geogrelha	areia	0,2	31,1
		brita	0	44,4
18	Geogrelha	areia	0,2	28,8
		brita	0,3	33,9

9.5. Considerações Finais

O capítulo apresentou uma análise da resistência das interfaces solo-geossintético, obtidas em ensaios de cisalhamento direto inclinado. Nestes estudos, foram avaliadas as influências do tipo de solo, do tipo de geossintético e da tensão confinante nos resultados dos ensaios.

O programa experimental envolveu ensaios de cisalhamento direto convencional em dois tipos de geossintéticos e um solo (areia), utilizado na condição fofa (densidade relativa de 15%).

Foram executados ensaios de interface solo-solo, no equipamento de cisalhamento direto inclinado, obtendo-se os parâmetros de resistência nas mesmas condições de baixas tensões normais. Com isso, foram obtidos os valores de eficiência da interface.

Analisou-se a influência da tensão confinante, verificando-se que seu aumento acarretou em comportamentos similares, no que concerne à tensão cisalhante de ruptura para as diferentes interfaces.

Quanto à influência do tipo de solo, observou-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento do ângulo de atrito de interface. Verifica-se, também, que há uma redução da eficiência, na interface solo-geogrelha, e um aumento de eficiência, para a interface solo-geomembrana.

Com relação ao tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas com as interfaces solo-geogrelha. Isto pode ser explicado pelo fato que a geomembrana apresenta uma superfície lisa e polida, dificultando o imbricamento dos grãos do solo.

10. Resultados e Análises: Comparação dos Diferentes Ensaio

10.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo são comparados os resultados dos ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado realizados nesta pesquisa. As análises foram realizadas em termos de envoltórias de resistência, utilizando os resultados obtidos a partir das configurações de ensaio RP25Q-10 (Rampa, caixa de 25, Quadrada) e CI25Q-10 (Cisalhamento Inclinado, caixa de 25, Quadrada). Avaliou-se a influência da variação da distribuição da tensão normal nos resultados.

Seguindo o procedimento dos capítulos anteriores as envoltórias de resistência das interfaces foram obtidas através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais distintas. Os ensaios são identificados pelo valor inicial da tensão normal atuante na superfície de ruptura, ou seja, no momento em que a plataforma de ensaio se encontra na posição horizontal.

Para a obtenção das envoltórias de resistência foram considerados os valores das tensões normais e cisalhantes correspondentes à condição de ruptura.

A parcela da tensão confinante referente à camada de solo depende do tipo de material, espessura da camada de solo e densidade relativa. Desta forma, em todas as análises são especificadas as tensões confinantes consideradas.

Os ensaios são identificados por meio da mesma combinação de siglas apresentada nos capítulos anteriores: Ar para areia; GMPL para geomembrana Polimanta, GG35 para geogrelha Fortrac 35 e número 15 para a densidade relativa igual a 15%.

Os ensaios de cisalhamento direto inclinado foram realizados nas inclinações de 4,5°, 9° e 18°, envolvendo interfaces solo-solo e solo-geossintético. Adotou-se a seguinte nomenclatura para identificação destes ensaios: CI(4,5) representa o ensaio de cisalhamento inclinado a 4,5°; CI(9) corresponde ao

cisalhamento inclinado a 9° e CI(18), cisalhamento inclinado a 18°. Os ensaios de rampa foram denominados RP e os de cisalhamento direto convencional de CC.

10.2. Influência do Tipo de Ensaio

Para avaliar a influência do tipo de teste foram comparados ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado nas interfaces areia-areia com densidade relativa de 15% (Tabela 63). Apresenta-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de inclinação na ruptura (α_{rup}), tensões normal e cisalhante na ruptura (σ_{rup} e τ_{rup}), relação entre as tensões e ângulo de atrito secante (ϕ_{sec}). A Figura 258 apresenta uma comparação das relações entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal de todos os ensaios

Considerando a Tabela 63 e Figura 258, pode-se observar que os comportamentos das interfaces para os diferentes ensaios são semelhantes. Nas interfaces areia-areia a ruptura é atingida para valores reduzidos de deslocamento. Observa-se, também, que os deslocamentos tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante para todos os ensaios.

Tabela 63 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15

Ensaio	σ (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
RP	1,4	9,8	20	1,32	0,77	0,58	30,1
	2,1	6,5	21	1,96	1,05	0,54	28,2
	3,5	3,0	22	3,23	1,62	0,50	26,6
CI(18)	1,8	8,8	18	1,71	1,03	0,60	31,0
	3,2	5,5	18	3,03	1,66	0,55	28,7
	5,0	5,6	18	4,76	2,52	0,53	27,9
CI(9)	1,8	11,5	9	1,78	1,29	0,72	35,9
	3,2	7,5	9	3,15	1,90	0,60	31,1
	5,0	8,5	9	4,95	2,69	0,54	28,5

Tabela 63 (cont.) - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15

Ensaio	σ (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ_{rup}/σ_{rup}	
CI(4,5)	1,8	5,8	4,5	1,79	1,27	0,71	35,4
	3,2	6,0	4,5	3,18	2,03	0,64	32,6
	5,0	7,0	4,5	4,99	3,00	0,60	31,0
CD	1,1	23,5	0	1,10	0,93	0,85	40,2
	1,8	21,8	0	1,80	1,36	0,76	37,1
	3,2	15,3	0	3,19	2,36	0,74	36,5
	4,6	15,0	0	4,58	3,11	0,68	34,2
	5,6	13,5	0	5,59	3,59	0,64	32,7
	7,0	11,8	0	6,98	4,30	0,62	31,6

Na Figura 258, observa-se, que independente do tipo de ensaio, os valores de ângulo de atrito se reduzem com o aumento da tensão normal. Esta redução é mais significativa para os ensaios de cisalhamento inclinado a 9°. Resultados semelhantes foram observados por Lalarakotoson *et al.* (1999) e Gourc *et al.* (1996).

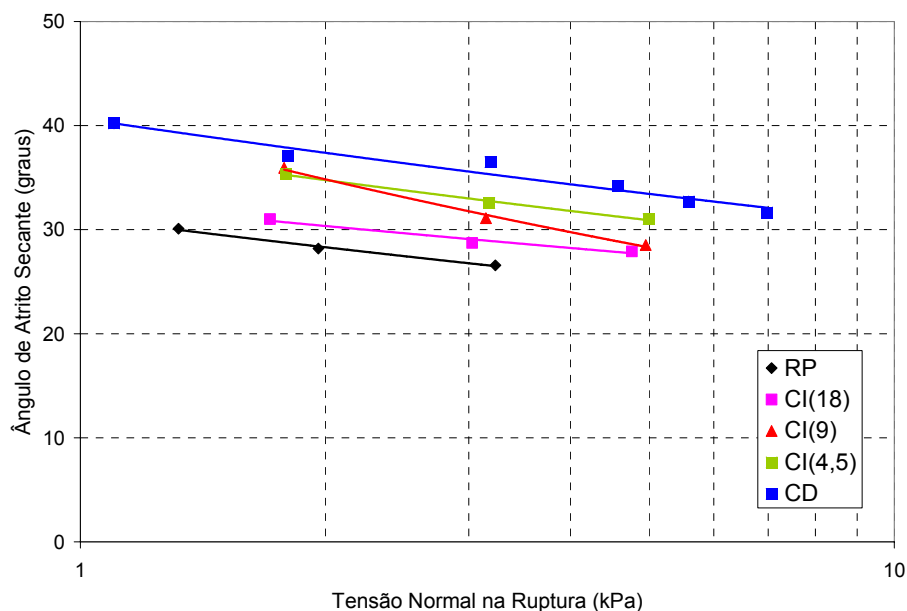


Figura 258 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15xAr15.

A Figura 259 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-areia na densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 24,0° para o ensaio de rampa, coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 26,1° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 18°, coesão de 0,5kPa e ângulo de atrito de 23,8° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 9°, coesão de 0,3kPa e ângulo de atrito de 28,4° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 4,5°, e coesão de 0,4kPa e ângulo de atrito de 30,1° para o ensaio de cisalhamento direto convencional. Desta forma, os valores obtidos indicam um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

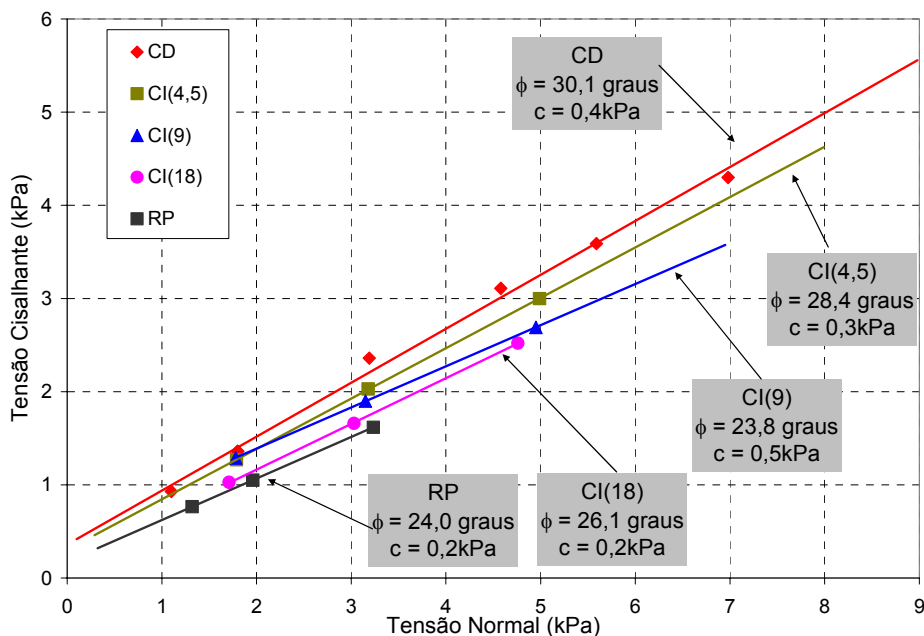


Figura 259 - Envoltórias de resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xAr15.

A avaliação da influência do tipo de ensaio (rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado) também é realizada para as interfaces areia-geogrelha com densidade relativa de 15% (Tabela 64). Apresenta-se os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de inclinação na ruptura (α_{rup}), tensões normal e cisalhante na ruptura (σ_{rup} e τ_{rup}), relação entre as tensões e ângulo de atrito secante (ϕ_{sec}). A Figura 260 apresenta as relações entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal de todos os ensaios.

Considerando a Tabela 64 e Figura 260, pode-se observar que os comportamentos das interfaces para os diferentes ensaios são diferentes. Nas

interfaces areia-geogrelha a ruptura também é atingida para valores reduzidos de deslocamento, porém não existe uma tendência geral definida de comportamento dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para os diferentes tipos de ensaio. Para os ensaios de rampa, nota-se uma tendência de aumento de deslocamentos com o aumento da tensão normal. O contrário é observado para os ensaios CI(18). Para os outros dois ensaios não se identifica um padrão.

Tabela 64 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces areia-geogrelha na $D_r=15\%$

Ensaio	σ_n (kPa)	$\delta_{rup.}$ (mm)	$\alpha_{rup.}$ (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	$\tau_{rup} / \sigma_{rup}$	
RP	1,4	3,3	21	1,31	0,80	0,61	31,4
	2,1	4,5	22	1,95	1,10	0,56	29,4
	2,8	5,5	24	2,55	1,47	0,58	30,0
	3,5	6,8	24	3,19	1,76	0,55	28,9
	4,6	4,3	24	4,20	2,21	0,53	27,7
CI(18)	1,8	9,5	18	1,71	1,17	0,68	34,4
	3,2	8,3	18	3,03	1,90	0,63	32,1
	5,0	4,3	18	4,76	2,85	0,60	30,9
CI(9)	1,8	8,3	9	1,78	1,25	0,70	35,1
	3,2	7,5	9	3,15	2,05	0,65	33,1
	5,0	9,3	9	4,95	3,16	0,64	32,6
CD	1,8	8,0	0	1,80	1,36	0,76	37,2
	3,2	7,3	0	3,19	2,18	0,68	34,2
	4,6	10,8	0	4,58	3,07	0,67	33,8
	7,0	6,0	0	6,98	4,55	0,65	33,0
	8,4	8,0	0	8,41	5,42	0,64	32,6

Na Figura 260, observa-se, da mesma forma que nas interfaces areia-areia, a redução do ângulo de atrito com o aumento da tensão normal, independentemente do tipo de ensaio.

A Figura 261 exibe as envoltórias de resistência das interfaces areia-geogrelha para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: coesão de 0,2kPa e ângulo de atrito de 26,2° para o ensaio de rampa, coesão de 0,2kPa e

ângulo de atrito de $28,8^\circ$ para o ensaio de cisalhamento inclinado a 18° , coesão de $0,2\text{kPa}$ e ângulo de atrito de $31,1^\circ$ para o ensaio de cisalhamento inclinado a 9° e coesão de $0,2\text{kPa}$ e ângulo de atrito de $31,7^\circ$ para o ensaio de cisalhamento direto convencional. Portanto, os valores indicam um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

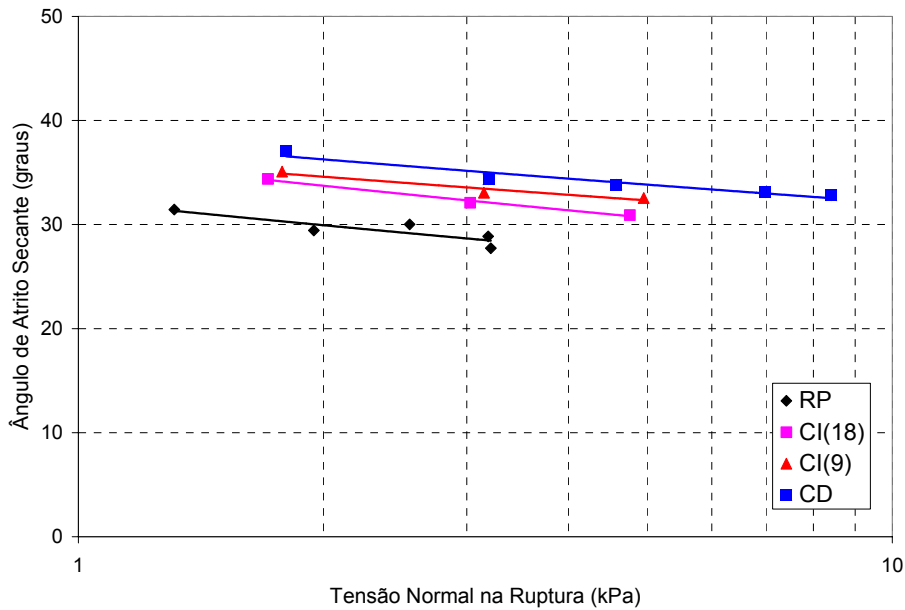


Figura 260 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15XGG35.

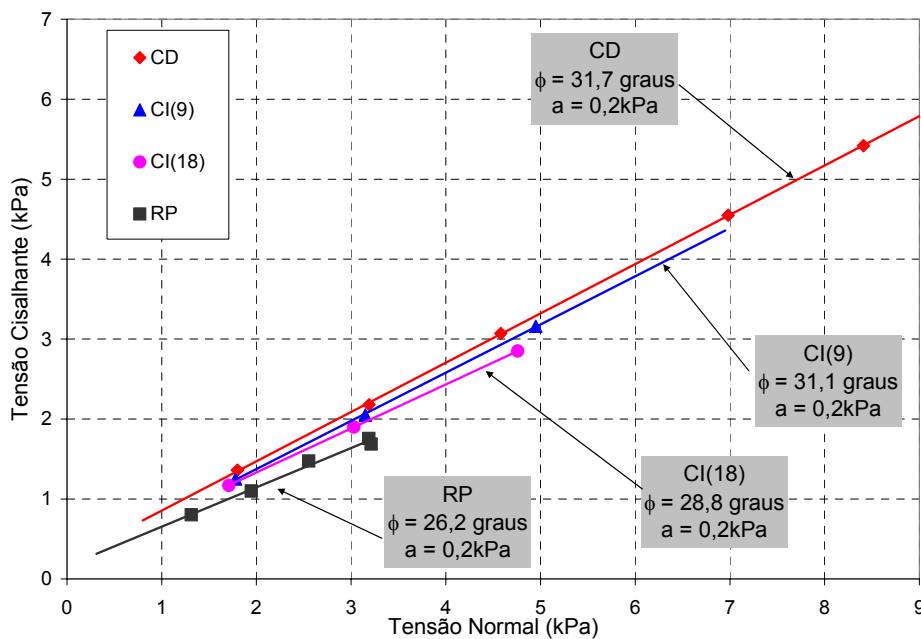


Figura 261 - Envoltórias de Resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15XGG35.

A mesma análise da influência do tipo de ensaio nos resultados é realizada para as interfaces solo-geomembrana. A Tabela 65 apresenta os valores de tensão normal (σ), deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), ângulo de inclinação na ruptura (α_{rup}), tensões normal e cisalhante na ruptura (σ_{rup} e τ_{rup}), relação entre as tensões e ângulo de atrito secante (ϕ_{sec}). A Figura 262 apresenta a comparação das relações entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal de todos os ensaios.

Tabela 65 - Resultados dos diferentes ensaios para interfaces areia-geomembrana na $D_r=15\%$

Ensaio	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (graus)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (graus)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	σ_{rup} (kPa)	
RP	1,4	2,25	9	1,39	0,35	0,25	14,2
	2,8	0,75	9	2,76	0,57	0,21	11,6
	4,6	0,25	9	4,56	0,85	0,19	10,6
CI(4,5)	1,8	1,3	4,5	1,79	0,36	0,20	11,4
	3,2	0,3	4,5	3,18	0,62	0,20	11,1
	5,0	0,3	4,5	4,99	0,99	0,20	11,2
CI(9)	1,8	0	9	1,78	0,28	0,16	9,0
	3,2	0	9	3,15	0,50	0,16	9,0
	5,0	0	9	4,95	0,78	0,16	9,0
CD	3,2	0,5	0	3,19	0,66	0,21	11,6
	6,3	0,5	0	6,30	1,32	0,21	11,8
	8,4	0,8	0	8,41	1,82	0,22	12,2

Considerando a Tabela 65 e a Figura 262, pode-se observar que os comportamentos das interfaces para os diferentes ensaios são semelhantes. Nas interfaces areia-geomembrana a ruptura é atingida para valores reduzidos de deslocamento. Considerando todos os ensaios, nota-se que não há um comportamento geral definido dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para todos os ensaios. Para os ensaios de rampa e CI(4,5) existe uma tendência de diminuição dos deslocamentos com o aumento da tensão normal. Já para os outros ensaios CI(9) e CD, não se verifica variação dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante.

A Figura 262 apresenta os resultados de resistência de interfaces para os diferentes ensaios em termos de ângulo de atrito secante. Observa-se, que nos ensaios de cisalhamento não há variação significativa do ângulo de atrito secante com a tensão normal. O contrário é observado nos ensaios de rampa, onde o aumento da tensão normal resulta em uma redução do ângulo de atrito secante.

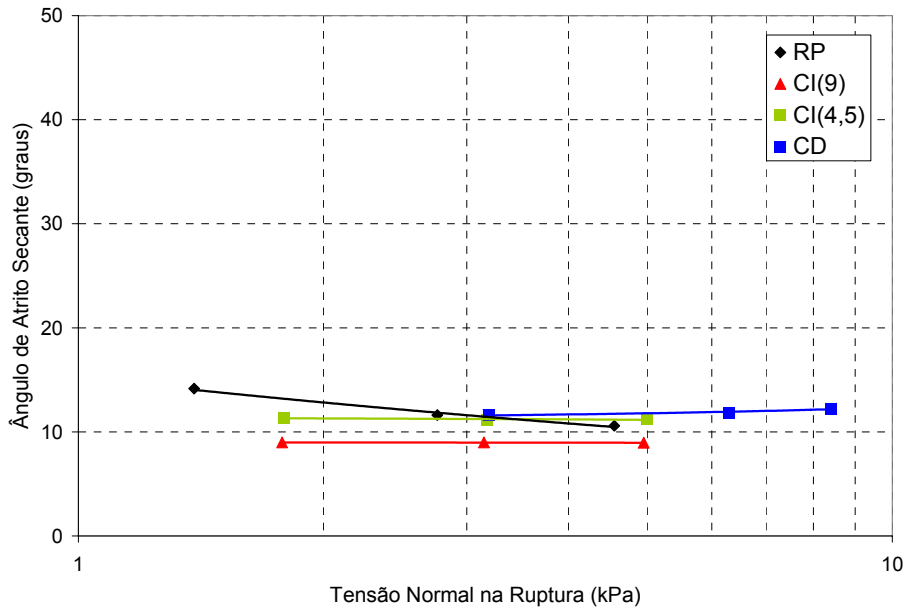


Figura 262 - Relação entre o ângulo de atrito secante e a tensão normal - Interfaces Ar15xGMPL.

Na Figura 263 são exibidas as envoltórias de resistência das interfaces areia-geomembrana para a densidade relativa de 15%. Os parâmetros obtidos foram: adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 9° para o ensaio de rampa, coesão de 0kPa e ângulo de atrito de 9° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 9°, adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 11,1° para o ensaio de cisalhamento inclinado a 4,5° e adesão de 0kPa e ângulo de atrito de 12,6° para o ensaio de cisalhamento direto convencional. Os valores indicam um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

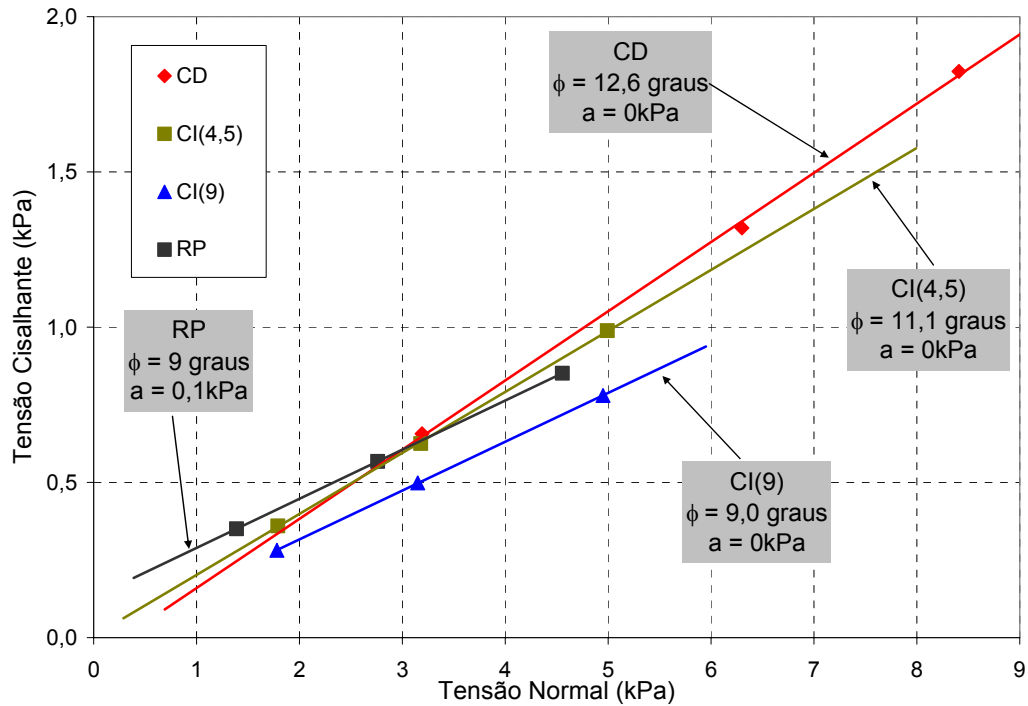


Figura 263 - Envoltórias de Resistência dos diferentes ensaios para interfaces Ar15xGMPL.

Considerando-se todos os tipos de testes, observa-se, de forma geral, que os ensaios de cisalhamento direto convencional apresentam os maiores valores de parâmetros de interface. Os menores valores são obtidos por meio dos ensaios de rampa. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado representam uma condição intermediária.

Uma possível explicação para este comportamento é esquematizada na Figura 264, onde são apresentadas as variações das tensões normais e cisalhantes durante os ensaios de rampa (RP), cisalhamento direto convencional (CC) e inclinado (CI). Nela são apresentadas três envoltórias de ruptura hipotéticas e suas respectivas trajetórias de variação de tensões (normal e cisalhante), baseadas nos resultados apresentados neste capítulo.

Para uma dada tensão normal inicial σ_3 , por exemplo, o procedimento de ensaio de rampa consiste em bascular a plataforma de ensaio até que ocorra o escorregamento da caixa de ensaio superior em relação à inferior. Neste caso, tanto a tensão normal média como a tensão cisalhante variam. A trajetória de tensões é curva até a ruptura (trajetória 1). Observa-se que a tensão normal diminui enquanto a tensão cisalhante aumenta.

No caso do ensaio de cisalhamento direto convencional, o procedimento consiste em cisalhar a amostra até que ocorra a ruptura. Desta forma, somente a tensão cisalhante varia, enquanto a tensão normal permanece constante (trajetória 2). Já o ensaio de cisalhamento direto inclinado (trajetória 3) pode ser considerado um híbrido de ensaios de rampa e cisalhamento convencional. Neste ensaio a plataforma de ensaio é basculada até um ângulo pré-determinado (fase rampa) e, em seguida, cisalhada até a ruptura (fase cisalhamento).

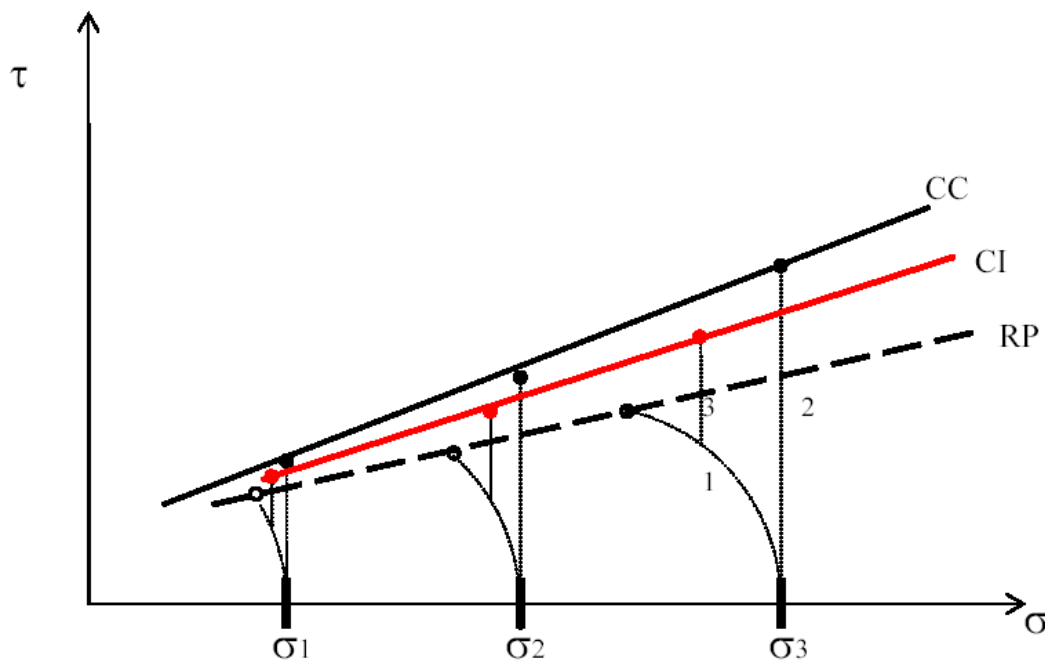


Figura 264 - Trajetória das tensões normais e cisalhantes nos ensaios de rampa (RP), cisalhamento direto convencional (CC) e inclinado (CI).

A variação da tensão normal durante os ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado parece condicionar a resistência final da interface. Isso foi observado nos resultados apresentados neste capítulo para as três interfaces ensaiadas e em diferentes condições de ensaio.

10.3. Considerações Finais

Neste capítulo foram comparados os resultados dos ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado realizados nesta pesquisa. As

análises foram realizadas em termos de envoltórias de resistência, utilizando os resultados obtidos a partir das configurações de ensaio RP25Q-10 e CI25Q-10.

Considerando todos os ensaios realizados com as interfaces areia-areia, observou-se que a ruptura é atingida para valores reduzidos de deslocamento, os deslocamentos e os ângulos de atrito tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante, independentemente do tipo de ensaio. Os valores obtidos indicam ainda um decréscimo do ângulo de atrito de interface com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

Nas interfaces areia-geogrelha, a ruptura também é atingida para valores reduzidos de deslocamento, porém não existe uma tendência geral definida de comportamento dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para os diferentes tipos de ensaio. Entretanto, nota-se a redução do ângulo de atrito com o aumento da tensão normal, independentemente do tipo de ensaio. Além disto, o ângulo de atrito de interface diminui com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

Nos ensaios das interfaces areia-geomembrana a ruptura também é atingida para valores reduzidos de deslocamento. Nota-se que não há um comportamento geral definido dos deslocamentos com o aumento da tensão confinante para todos os ensaios. Nos ensaios de cisalhamento não há variação significativa do ângulo de atrito secante com a tensão normal. O contrário é observado nos ensaios de rampa, onde o aumento da tensão normal resulta em uma redução do ângulo de atrito secante. De forma análoga ao comportamento das outras interfaces, o ângulo de atrito diminui com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio.

Considerando-se todos os tipos de testes, observa-se, de forma geral, que os ensaios de cisalhamento direto convencional fornecem os maiores valores de parâmetros de interface. Os menores valores são obtidos por meio dos ensaios de rampa. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado representam uma condição intermediária.

11. Conclusões e Sugestões

A importância do estudo de interfaces solo-geossintético é inquestionável. Os ensaios normalmente utilizados para isto são cisalhamento direto, arrancamento e rampa, sendo que a escolha do ensaio mais adequado é função do tipo de geossintético e de sua solicitação na massa de solo.

Sendo assim, este trabalho teve como finalidade construir um equipamento capaz de realizar ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado e arrancamento.

O objetivo principal consistiu em habilitar o equipamento desenvolvido para a execução de ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado. O equipamento e acessórios destes ensaios foram construídos e testados para quantificação do atrito entre caixas, limite do sistema de força cisalhante e limite de utilização do sistema de confinamento. Foram também realizados ensaios de acurácia para a avaliação da precisão do equipamento. Foram ensaiados interfaces, solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana, Os resultados dos ensaios foram interpretados e analisados em termos de resistência das interfaces solo-geossintético.

11.1. Conclusões

Apesar do caráter ainda incipiente do protótipo de equipamento de ensaio de desenvolvido, a pesquisa apresentada neste trabalho permite algumas conclusões gerais.

Em relação ao equipamento:

- (i) O equipamento tem capacidade de realizar ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado utilizando a mesma estrutura e acessórios;
- (ii) O equipamento de ensaio é formado por componentes simples, de custos reduzidos e fácil manutenção e operação;

- (iii) A configuração correspondente às duas caixas de ensaio, superior e inferior, permite a execução de ensaios em interfaces solo-solo e solo-rocha (brita).
- (iv) O sistema de rolamento da caixa superior sobre a inferior mostrou-se eficiente, garantindo a restrição de deslocamento lateral e a condição de atrito desprezível. A caixa superior (não preenchida) desloca-se a partir de inclinações de rampa inferiores a $0,5^\circ$;
- (v) As caixas de ensaio de dimensões diferentes garantem a manutenção de uma área de interface constante em qualquer momento do ensaio e evitam perda de material;
- (vi) O sistema de confinamento por placas de aço é eficiente quanto à uniformidade da área carregada. Porém, restringe a utilização do equipamento em função da tendência de tombamento quando o centro de gravidade se afasta do terço central do conjunto solo-placas;
- (vii) A instrumentação composta por 1 medidor de ângulo e 2 *tell-tales* mostrou-se adequada, além de oferecer as vantagens de custos reduzidos e simplicidade de operação.

Em relação aos ensaios das interfaces estudadas:

- (i) Os ensaios de acurácia forneceram valores de desvio padrão e coeficiente de variação reduzidos, indicando a confiabilidade dos resultados de ensaios;
- (ii) As análises da influência das dimensões das caixas de ensaio demonstraram que a relação comprimento/altura interfere significativamente nos resultados;
- (iii) As variações da forma e tamanho das caixas de ensaios pouco afetam os resultados desde que respeitados os limites de utilização do equipamento;
- (iv) As análises da influência da metodologia de teste indicaram que os ensaios de rampa com face inclinada não forneceram bons resultados quando comparados aos ensaios com as faces verticais;
- (iv) A análise da influência do desgaste excessivo e do dano da geomembrana mostrou que eles alteram significativamente os resultados, uma vez que alteram a rugosidade da superfície do geossintético;
- (v) A apresentação dos resultados dos ensaios por meio de curvas deslocamento vs tensão cisalhante permitiu a utilização de um critério de ruptura unificado.

Em relação aos ensaios de rampa das interfaces:

- (i) A análise da influência da tensão confinante nos resultados indicou que seu aumento tem conseqüências distintas. Nas interfaces solo-solo, solo-geogrelha e solo-geomembrana Cipageo, o ângulo de rampa aumenta com o acréscimo da tensão confinante. Entretanto, para a interface areia-geomembrana Polimanta, independente da densidade relativa, não há variação do ângulo de rampa na ruptura. O comportamento desta interface é condicionado pela estrutura da geomembrana lisa e polida;
- (ii) Em relação à influência da densidade relativa do solo, observou-se que o aumento de 15 para 90% corresponde a um aumento de 2,7° no ângulo de atrito de interface para a geogrelha. Para as duas interfaces com geomembranas, não se observou variação significativa no ângulo de atrito;
- (iii) A redução da densidade relativa do solo mostra que, para todas as interfaces ensaiadas, há uma perda de eficiência, sendo mais acentuada nas interfaces solo-geomembrana;
- (iv) O aumento da densidade relativa corresponde a uma redução dos deslocamentos na ruptura para as três interfaces. Entretanto, não se observa tendência quanto à variação do ângulo de rampa, pois a interface areia-geogrelha apresenta uma tendência de elevação do ângulo de rampa, a interface solo-geomembrana Cipageo uma redução e na interface solo-geomembrana Polimanta não se observa variação;
- (v) Quanto à influência do tipo de solo, o ângulo de atrito aumenta com o aumento da granulometria para todas as interfaces ensaiadas. Verifica-se, também, que com aumento da granulometria, houve redução da eficiência na interface solo-geogrelha e um acréscimo para a interface solo-geomembrana;
- (vi) Em relação ao tipo de geossintético, as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência quando comparadas às interfaces solo-geogrelha, devido à estrutura do geossintético.

Em relação aos ensaios de cisalhamento direto convencional das interfaces:

- (i) As análises de influência da tensão normal nas tensões cisalhantes de ruptura indicaram que as diferentes interfaces apresentam comportamentos semelhantes;
- (ii) Quanto à influência do tipo de solo, observou-se que o aumento da granulometria das interfaces corresponde a um aumento do ângulo de atrito. Verificou-se, também, que há uma redução da eficiência na interface solo-geogrelha e um aumento para a interface solo-geomembrana;
- (iii) Em relação ao tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência quando comparadas com as interfaces solo-geogrelha, devido à estrutura do material.

Em relação aos ensaios de cisalhamento direto inclinado das interfaces:

- (i) As análises da influência da tensão normal indicaram que seu aumento acarretou em comportamentos similares, no que concerne à tensão cisalhante de ruptura para as diferentes interfaces;
- (ii) Quanto à influência do tipo de solo, observou-se que o aumento da granulometria corresponde a um aumento do ângulo de atrito de interface. Verifica-se, também, que há uma redução da eficiência, na interface solo-geogrelha, e um aumento de eficiência, para a interface solo-geomembrana;
- (iii) Com relação ao tipo de geossintético, as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas com as interfaces solo-geogrelha, em função da estrutura do material.

Em relação à comparação entre ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado:

- (i) Os deslocamentos correspondentes à ruptura são reduzidos independentemente do tipo de ensaio e de interface;
- (ii) Nas interfaces areia-areia e areia-geogrelha, os ângulos de atrito tendem a diminuir com o aumento da tensão confinante, independentemente do tipo de ensaio;

(iii) Nas interfaces areia-geomembrana, não há variação significativa do ângulo de atrito secante com a tensão normal obtido de ensaios de cisalhamento. Ao contrário dos ensaios de rampa, nos quais ângulo de atrito secante diminui com aumento da tensão normal;

(iv) O ângulo de atrito de interface diminui com o aumento da inclinação da plataforma de ensaio para todas as interfaces ensaiadas;

(v) Os ensaios de cisalhamento direto convencional forneceram os maiores valores de parâmetros de interface. Os menores valores são obtidos por meio dos ensaios de rampa. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado forneceram parâmetros intermediários.

11.2. Sugestões para Futuras Pesquisas

O estudo desenvolvido neste trabalho representa apenas a etapa inicial de um amplo projeto de pesquisa sobre comportamento mecânico e resistência de interfaces solo-geossintético. Várias sugestões para pesquisas futuras podem ser salientadas, entre elas:

(i) Comparação dos comportamentos de resistência das interfaces deste trabalho obtidos de ensaios de rampa e cisalhamento direto com os obtidos de ensaios de arrancamento;

(ii) Estudo da resistência de interfaces com outros materiais e geossintéticos para comparação dos mecanismos;

(iii) Avaliação da mobilização de resistência no geossintético em ensaios de rampa instrumentados com células de carga e transdutores de deformação;

(iv) Estudo da fluência de geossintéticos em ensaios de rampa;

(v) Aprimoramento do equipamento através das melhorias do sistema de confinamento e da instrumentação;

(vi) Habilitação e calibração do equipamento para ensaios de arrancamento e cisalhamento direto para tensões mais elevadas;

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-5321**: Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. 1998.

AGUIAR, V. R. **Ensaio de Rampa para o Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

ALFARO, M. C.; MIURA, N.; BERGADO, D. T. Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests. **Geotechnical Testing Journal.**, vol.18 (2), p. 157-167, 1995

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**, São Leopoldo, Ed. Unisinos, 2003, 413p.

ATHANASPOULOS, G. A. Effect of particle size on the mechanical behavior of sand-geotextile composites. **Geotextiles and Geomembranes**. Local, vol. 12, p. 255-273. 1993

BECKER, L. B. **Comportamento de geogrelhas em muro de solo reforçado e em ensaios de arrancamento**. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.

BOMFIM, R. B. **Avaliação da Tensão lateral de Campo de Argilas Sobreadensadas: Ensaio de Laboratório com um Solo da Formação**

Guabirota. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2001.

BRIANÇON, L., GIRARD, H., POULAIN, D. (2002) Slope stability of lining systems-experimental modeling of frictional at geosynthetic interfaces. **Geotextiles and Geomembranes**. V. 13 (5), p. 147-172.

CASTRO, D. C. **Ensaio de Arrancamento de Geogrelhas no Campo e no Laboratório**. 135p. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1999.

CHRISTOPHER, B. R.; GILL, S. A.; GIROUD, J. P.; JURAN, I. , MITCHELL, J. K.;SCHLOSSER, F.; DUNNICLIFF, J. **Reinforced soil structures**. U.S. Department of Transportation, publication nº FHWA-RD-89-043, 1990.

CIPATEX. Especificações Técnicas da Geomembrana Cipageo, 2003.

DEMBICKI, E., JERMOLOWICZ, P.; Soil-Geotextiles Interaction. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 10, pp. 249-268, 1990.

Deutsche Norm. DIN EN 963. geotextiles and geotextiles-related products: Sampling and preparation of test specimens, 1995.

ENGEPOL. Especificações Técnicas da Geomembrana Polimenta, 2007

FANNIN, R. J., e RAJU, D. M. On the Pullout Resistance of Geosynthetics. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 30, pp. 409-417. 1993.

FARRAG, K., ACAR, Y.B. e JURAN, I. (1993) Pullout Resistance of Geogrids Reinforcements. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 12, pp. 133-159.

GIRARD, H., FISHER, S.; ALONSO, E. Problems of Friction Posed by Use of Geomembranes on Dam Slopes-Examples and Measurements. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 9, pp. 339-342, 1990.

GIROUD, J.P., SWAN, R.H., RICHER, P.J. e SPOONER, P.R. Geosynthetic Landfill Cap: Laboratory and Field Tests, design and Construction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS (EUROGEO 1), 4 1990, Maastricht. **Proceedings...** Maastricht (Netherlands), 1990, v. 2, pp. 1039- 1046.

GOMES, R. C. **Interação Solo-Reforço e Mecanismo de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis**. São Paulo,. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

GOURC, J. P.; LALARAKOTOSON, S.; MÜLLER-ROCHHOLTZ, H.; BRONSTEIN, Z. Friction measurement by direct shearing or tilting process – **Development of a european standard, geosynthetics: applications, design and construction**. Edition of De Groot, Den Hoedt e Termaat, Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 1039-1046.

HSIEH, C.; HSIEH, M.H.; CHEN, J. (2002) – Direct shear behavior of sand geomembrane systems for various shear boxes – Geosynthetics – 7th ICG – Delmas, Gourc & Girard – Nice – França.

HUESKER. Especificações Técnicas da Geogrelha Fortrac, 2002.

HUESKER. Especificações Técnicas da Geogrelha Fortrac, 2003.

INGOLD, T.S. **A Laboratory investigation of soil-geotextiles friction**, Ground Engineering,pp. 21-28. 1984.

INGOLD, T.S. **A Laboratory Simulation of Reinforced Clay Walls**. Geotechnique, v.31, pp. 399-412. 1981.

INGOLD, T.S. (1990) – Friction Testing – **Geomembranes: identification and performance testing** – edited by A. Rollin and J.M. Rigo.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12957-2** Geotextiles and Geotextiles Related Products: Determination of Friction Characteristics (1 e 2). Genebra, 1999.

IZGIN, M. **Geomembrane-sand interface friction**. Dissertação de Mestrado. Middle East Technical Universal, Ankara, Turkey, 1997

IZGIN, M. e WASTI, Y.(1998) Geomembrane-Sand Interface Frictional Properties as Determined by Inclined Board and Shear Box Tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, pp.207-219,

JEWELL, R. A. **Some effects of reinforcement on mechanical behavior of soils**. Cambridge, 1980. Tese de Doutorado – Imperial College, Cambridge University.

JEWELL, R. A. Reinforcement Bond Capacity. **Geotechnique**, v.40, n.3, pp. 513-518.1990.

JEWELL, R. A.; WROTH, C.P. Direct Shear Test On Reinforced Sand. **Geotechnique**, v. 37, pp. 53-68. 1987.

JURAN, I.; KNOCHENMUS, G., ACAR, Y.B. E ARMAN, A. Pull Response of Geotextiles and geogrids. In: SYMPOSIUM. ON GEOSYNTHETICS FOR SOIL IMPROVEMENT, 18, 1988, Nashville. **Proceedings...** Nashville: Geotechnical Special Publication, 1988, pp. 92-111.

KOERNER, R. Desining with Geosynthetics. Prentice Hall, 1986.

KOERNER, R. M., Emerging and Future Developments of Selected Geosynthetic Applications, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, pp.293-306. 2000.

KOUTSOURAIS M., SANDRI, D., SWAN, R. (1998) Soil Interaction Characteristics of Geotextiles and Geogrids. **Six International Conference on Geosynthetics**, pp. 739-744.

LALARAKOTOSON, S; VILLARD, P.; GOURC, J.P. Shear Strength Characterization of Geosynthetic Interfaces on Inclined Planes. **Geotechnical Testing Journal**, 1999, Vol 22, N4, pp.284-291.

LEE, K.M.; MANJUNATH, V.R.(2000). Soil-geotextiles interface friction by direct shear tests, **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, pp. 238-252.

LIMA JÚNIOR, N.R. **Estudo da Aderência entre Solos e Geossintéticos em Ensaio de Rampa de Grandes Dimensões**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

LOPES, C.P.F.C. **Estudo da Interação Solo-Geossintético Através de Ensaio de Corte em Plano Inclinado**. 186p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000.

LOPES, M.L ; LADEIRA, M. (1996) Influence of the Confinement, Soil Density and displacement Ratio on Soil – Geogrid Interaction. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 14, n.10, pp. 543-554.

LOPES, M.L.; MOUTINHO, C. Resistência das Interfaces Solo-Geogrelha: Papel da Densidade e da Granulometria do Solo. In: CONGRESSOS NACIONAIS DE GEOTECNIA, 6, 1997, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa, v. 1, 1997, pp. 279-288.

MELLO, L.G.R. **Estudo da Interação Solo-Geossintético em Taludes de Obras de Disposição de Resíduos**. 130p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, 2001.

MELO, L.G.R., LIMA Jr., N.R., PALMEIRA, E.M. (2003) Estudo da Interação entre Interfaces de Solo e Geossintético em Taludes de Áreas de Disposição de Resíduos. **Solos e Rochas**, V.26 (1), pp.19-35

NAREJO, D.B. (2003) A simple tilt table device to measure index frictional angle of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**. V.21, pp.49-57.

NAKAMURA, T., e MITACHI, T. e IKEURA, I. (1999) Direct Shear Test Method as a means for estimating geogrid-sand interface shear-displacement behavior. **Soils and Foundations**, V.39 (4), pp.1-8.

PALMEIRA, E. M. **The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests.**, 238f. Tese de Doutorado. Magdalen College, University of Oxford, Oxford, 1987.

PALMEIRA, E.M. Execução e interpretação de ensaios de laboratório em geossintéticos. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, 1. 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 1999, pp. 87-108.

PALMEIRA, E.M., MILLIGAN, G. W. E.(1989) Large scale laboratory tests on reinforced sand, **Journal Soils and Foundations**. Japanese Geotechnical Society, vol. 36, n. 29, p. 18-30,

PALMEIRA, E.M. LIMA JR, N.R. & MELLO, L.G.R. (2002). Interaction between soils and geosynthetics layers in large scale ramp test. *Geosynthetics International* 9 (2), IFAI, USA, 149-187.

PITANGA, H.N.; GOURC. J.P.; ... Derivação do ângulo de Atrito Residual de Interfaces Geossintéticas Mediante Emprego do Equipamento Plano Inclinado. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSSINTÉTICOS, 1. 2007, Recife. **Anais...** Pernambuco: 2007.

REZENDE, E. S. **Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético Utilizando o Equipamento de Rampa**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

ROWE, R. K.; HO, S. K. Determination of geotextile stress-strain characteristics using a wide strip test. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EOTEXTILES, 3. 1986, Vienna. **Proceedings...** Vienna: 1986, pp. 885-890.

SARAMAGO R.P. Estudo da Influencia da Compactação no Comportamento de Muros de Solo Reforçado com a Utilização de Modelos Físicos. Tese de Doutorado, COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

SAYÃO, A. S. F. J., Geossintéticos – Aplicação em Estabilidade de Taludes, IX ISL, Rio de Janeiro, 2004.

SAYÃO, A. S. F. J.; TEIXEIRA, M. L. Utilização de geossintéticos para reforço de aterros sobre solos moles. In: In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS, 2. 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1995, pp. 169-180.

SIEIRA, A.C.C.F., Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha, 360p. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2003.

TAVARES, A. C. **Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético**. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008 (em andamento).

VERTEMATTI, J.C. Manual Brasileiro de Geossintéticos, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2004, 413p.

WASTI, Y. ÖZDÜZGÜN, Z.B. (2001) Geomembrane-geotextiles interface shear properties as determinaed by inclined board and direct shear box tests. **Geotextiles and Geomembranes** 19 pp-45-57.

Apêndice I. Configurações de Ensaio de Rampa

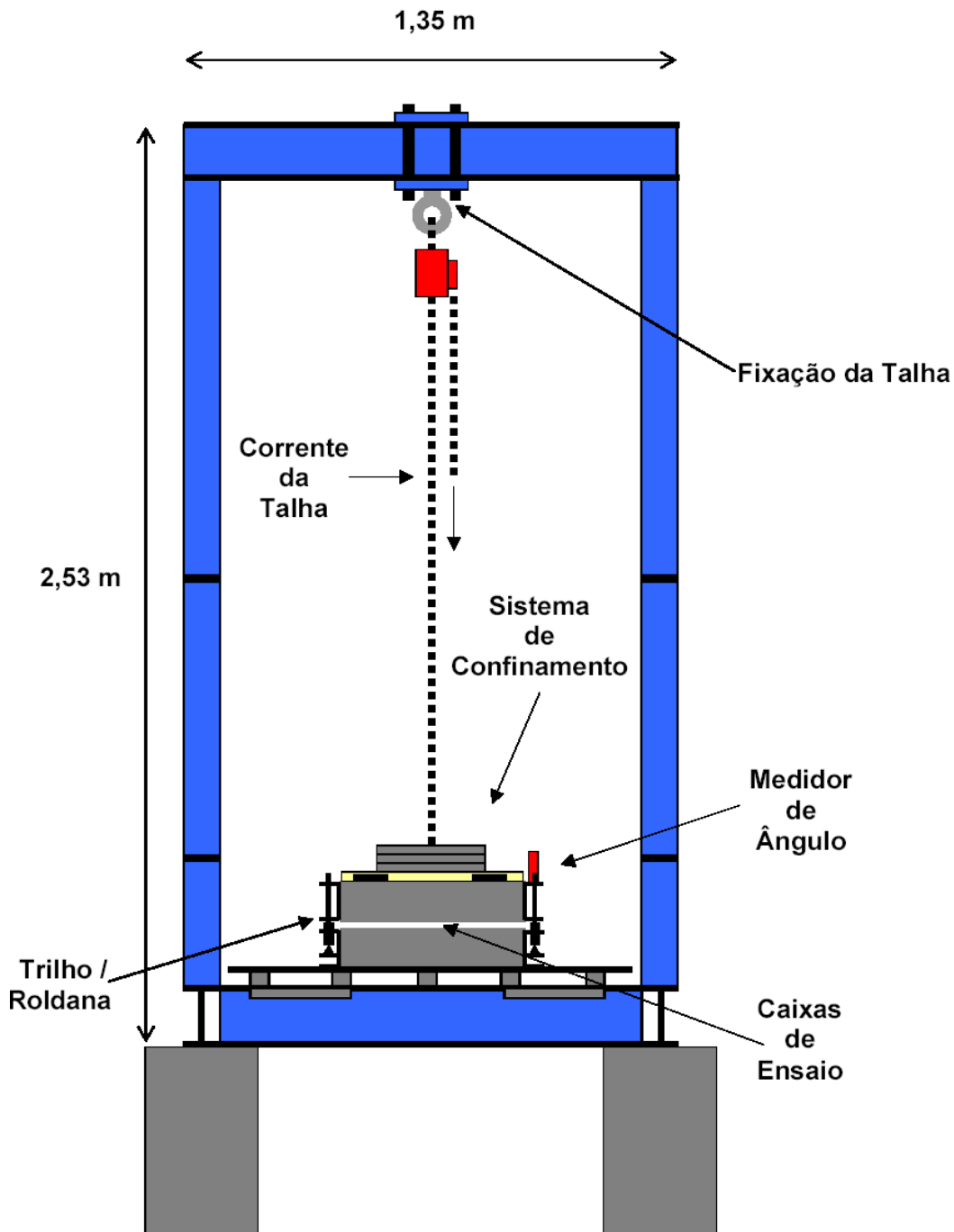
Características das configurações de ensaio de rampa

Tabela 66 - Resumo das características das configurações de ensaio de rampa

Características		Configuração de Ensaio				
		RP25Q- 10	RP50Q- 10	RP50R- 10	RP100Q- 10	RP100Q- 10
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	0,80	1,20	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	0,50	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	0,70	1,00	1,00	1,00
	largura (m)	0,50	0,70	0,50	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	0,50	1,00	1,00
Velocidade de Ensaio (°/min)		1	1	1	1	1
Medições	Ângulo (°)	sim	sim	sim	sim	sim
	deslocamento (mm)	sim	sim	sim	sim	sim
	carga horizontal (kN)	não	não	não	não	não
	carga vertical (kN)	não	não	não	não	não
Sistema de Aplicação de Carga Confinante	Direta	sim	sim	sim	sim	sim
	Pendural	não	não	não	não	não
	Bolsa de Ar	não	não	não	não	não
Sistema de Aplicação de Carga Cisalhante	Pesos	não	não	não	não	não
	Hidráulica	não	não	não	não	não
FACES DE FRENTE E FUNDO DA CAIXA SUPERIOR	V	sim	sim	sim	sim	sim
	I	não	sim	não	sim	não

V = vertical e I = inclinada, no caso 30°.

Configuração de ensaio de Rampa RP25Q-10



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 265 - Configuração de ensaio de rampa RP25Q-10 (vista frontal).

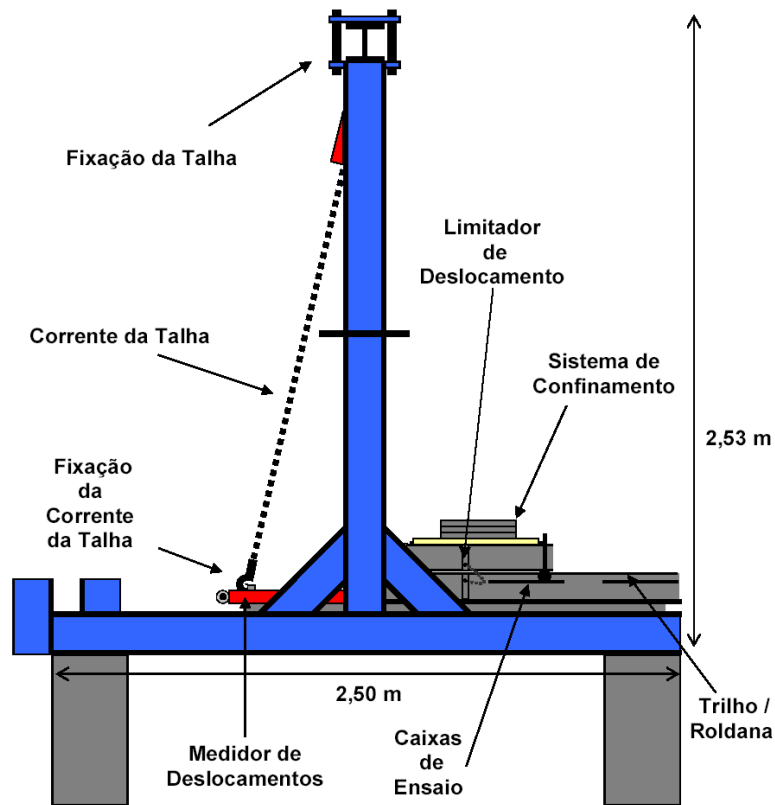


Figura 266 - Configuração de ensaio de rampa RP25Q-10 (vista lateral).

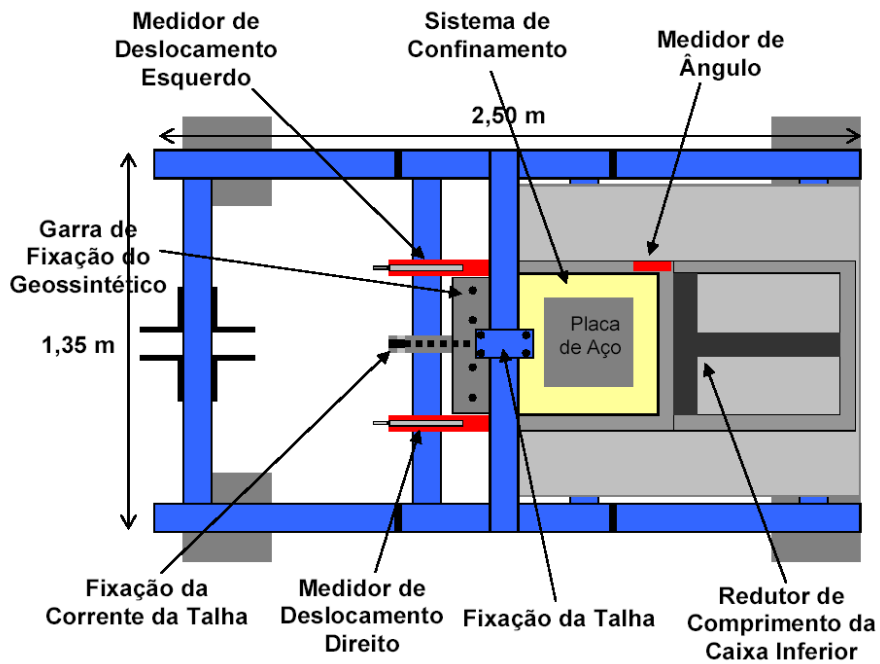


Figura 267 - Configuração de ensaio de rampa RP25Q-10 (vista superior).

Configuração de ensaio de Rampa RP50Q-10

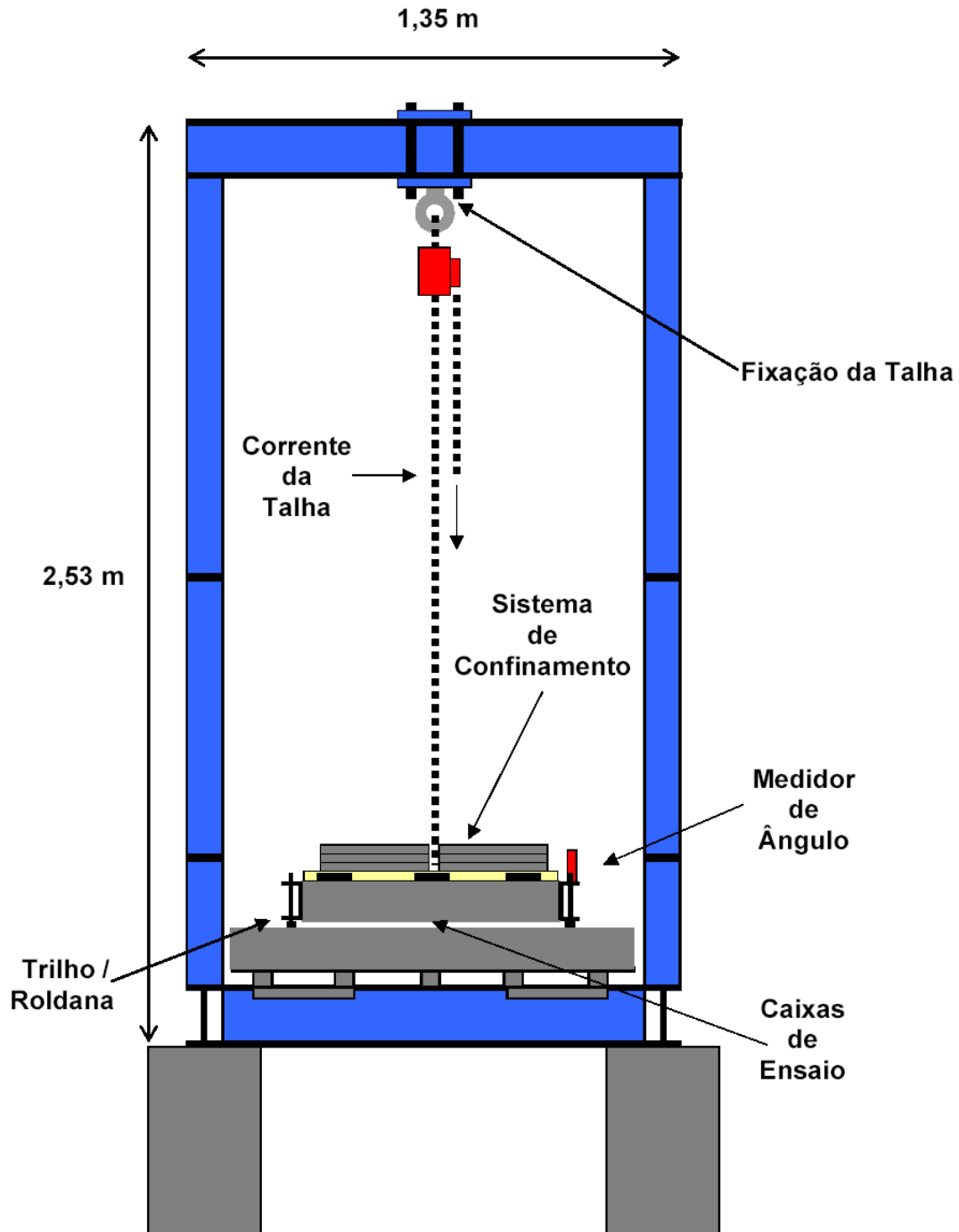


Figura 268 - Configuração de ensaio de rampa RP50Q-10 (vista frontal).

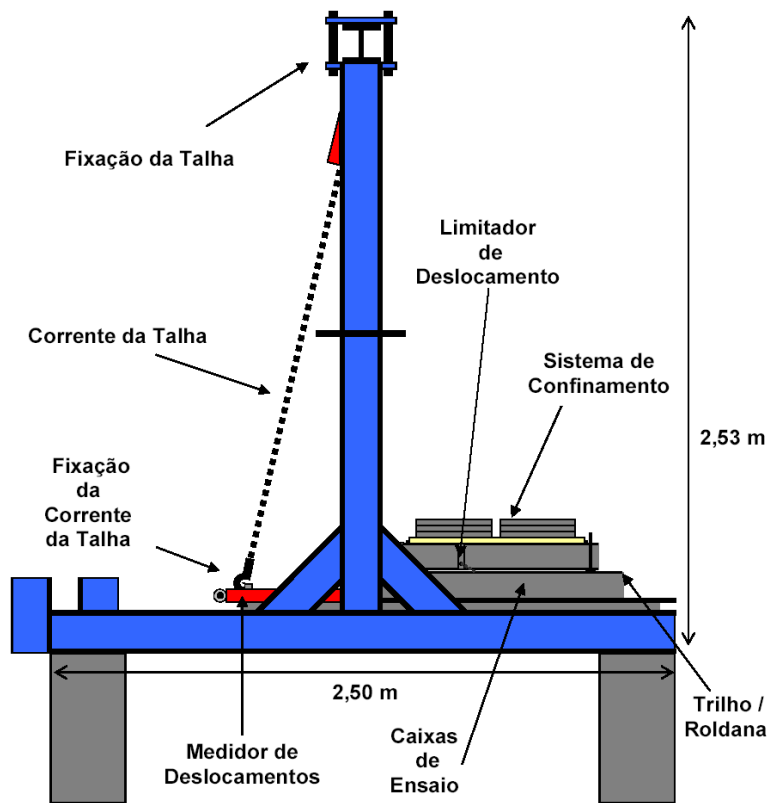


Figura 269 - Configuração de ensaio de rampa RP50Q-10 (vista lateral).

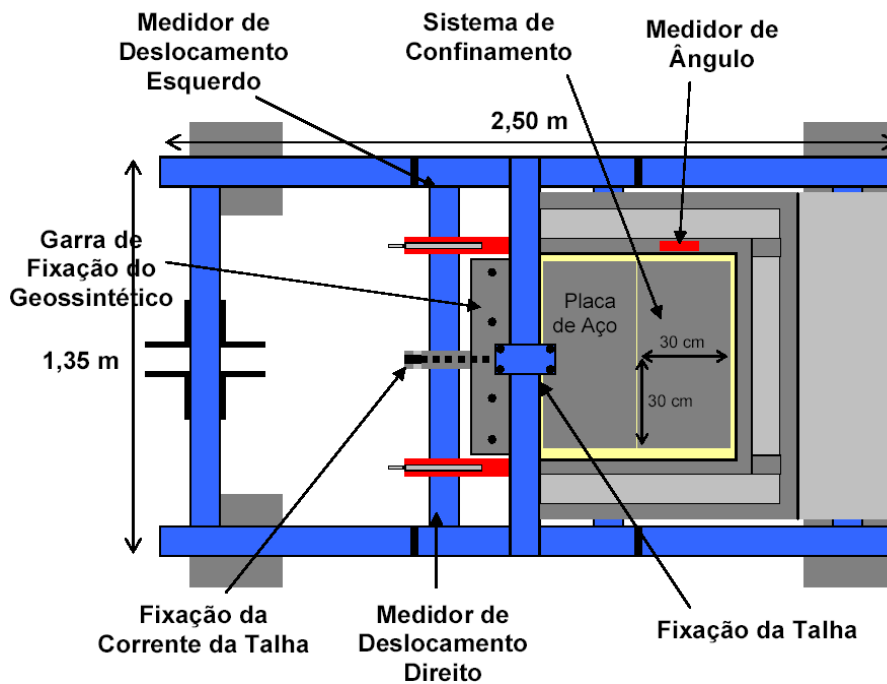
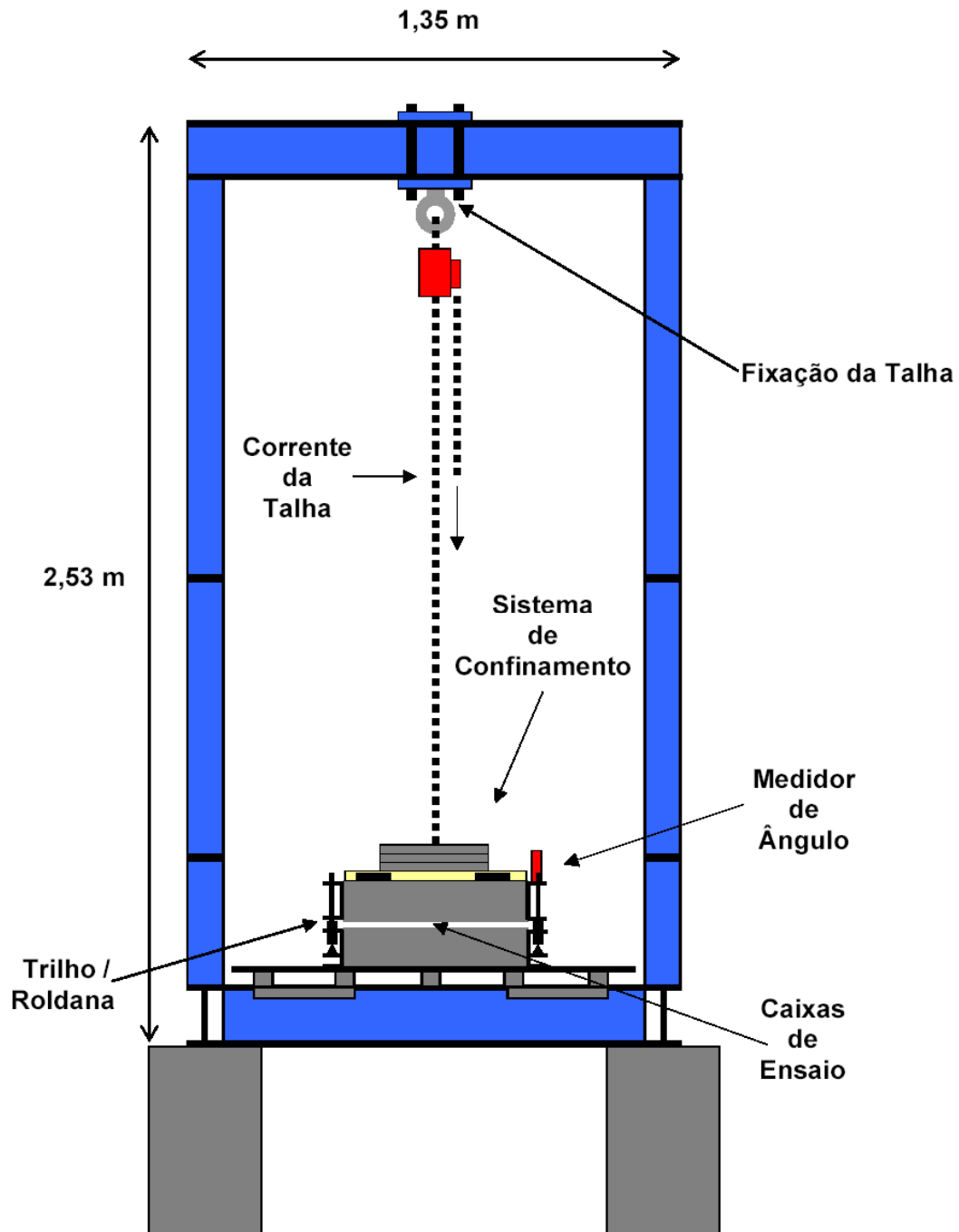


Figura 270 - Configuração de ensaio de rampa RP50Q-10 (vista superior).

Configuração de ensaio de Rampa RP50R-10



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 271 - Configuração de ensaio de rampa RP50R-10 (vista frontal).

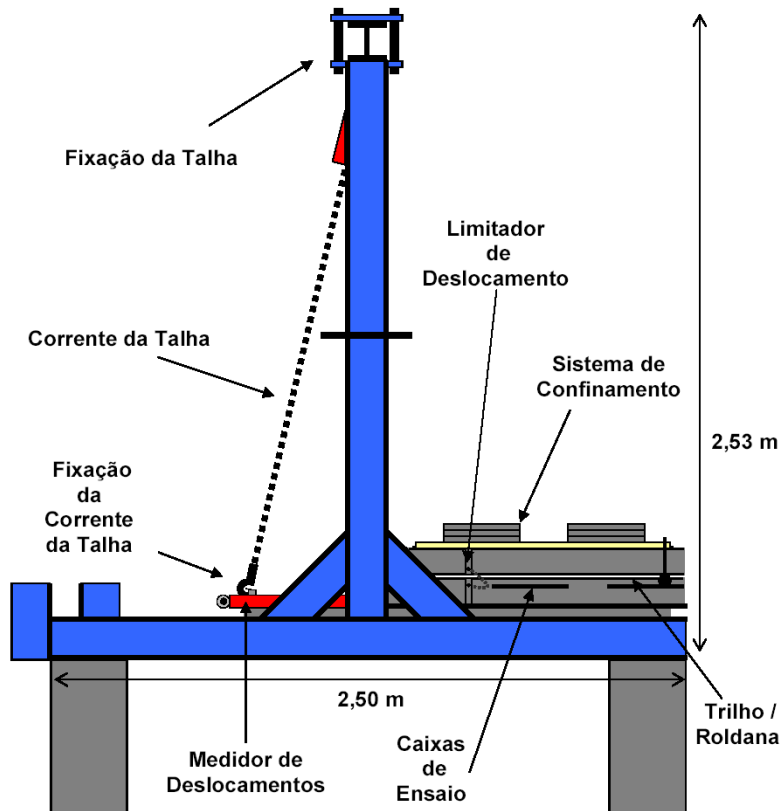


Figura 272 - Configuração de ensaio de rampa RP50R-10 (vista lateral).

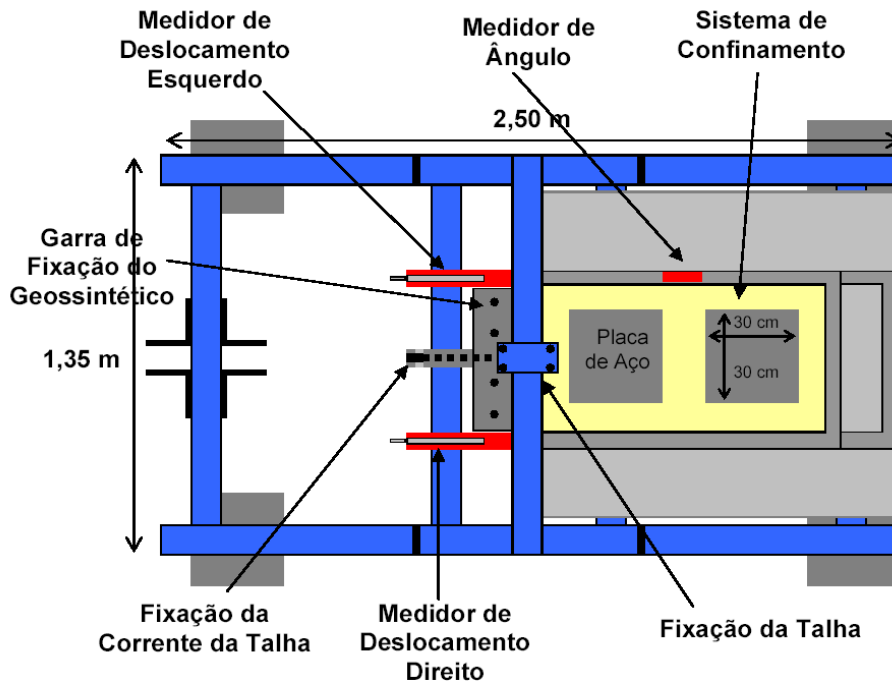
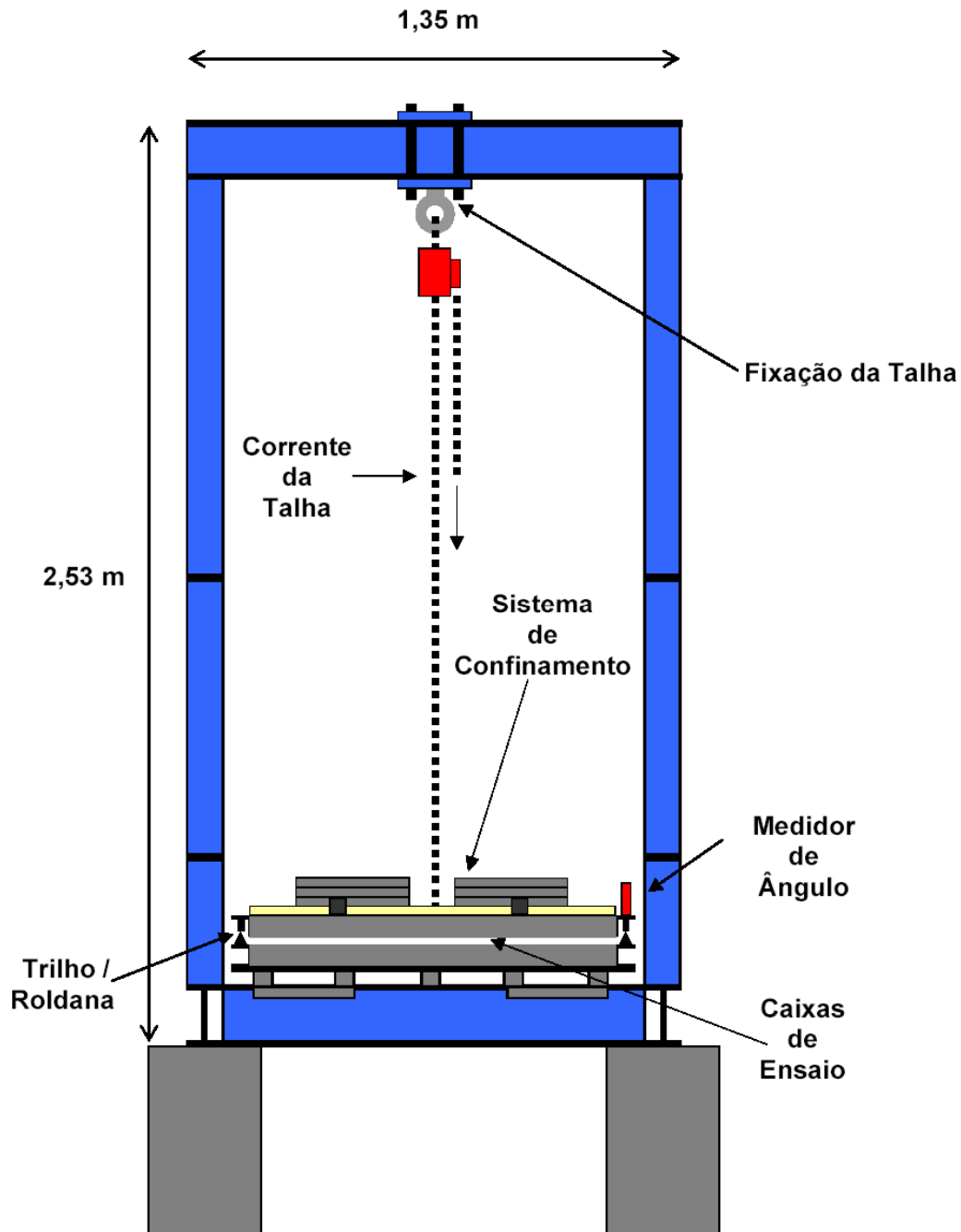


Figura 273 - Configuração de ensaio de rampa RP50R-10 (vista superior).

Configuração de ensaio de Rampa RP100Q-5



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 274 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 (vista frontal).

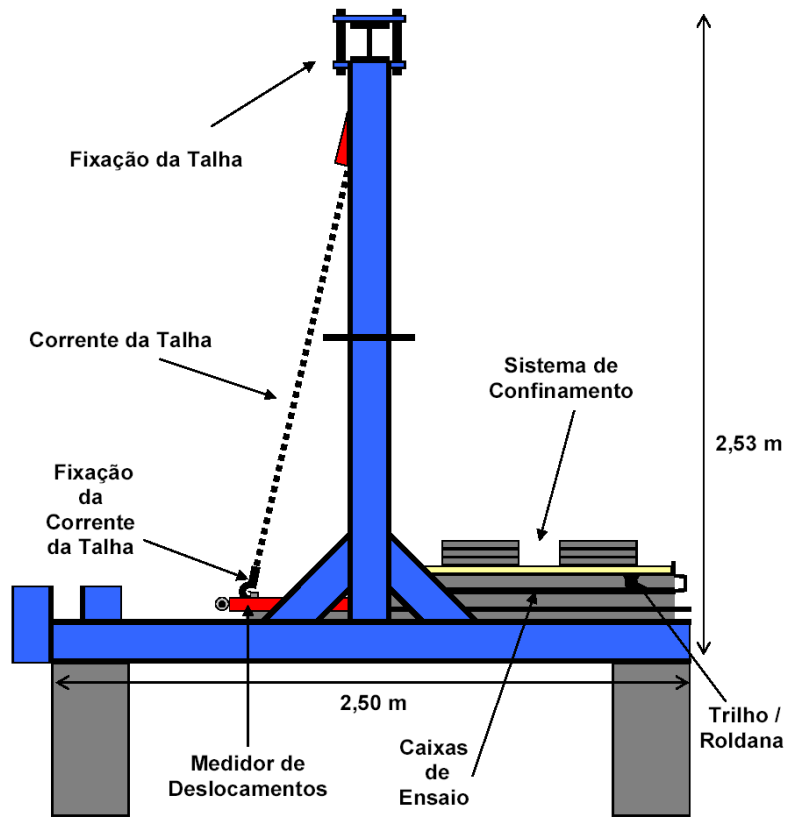


Figura 275 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 (vista lateral).

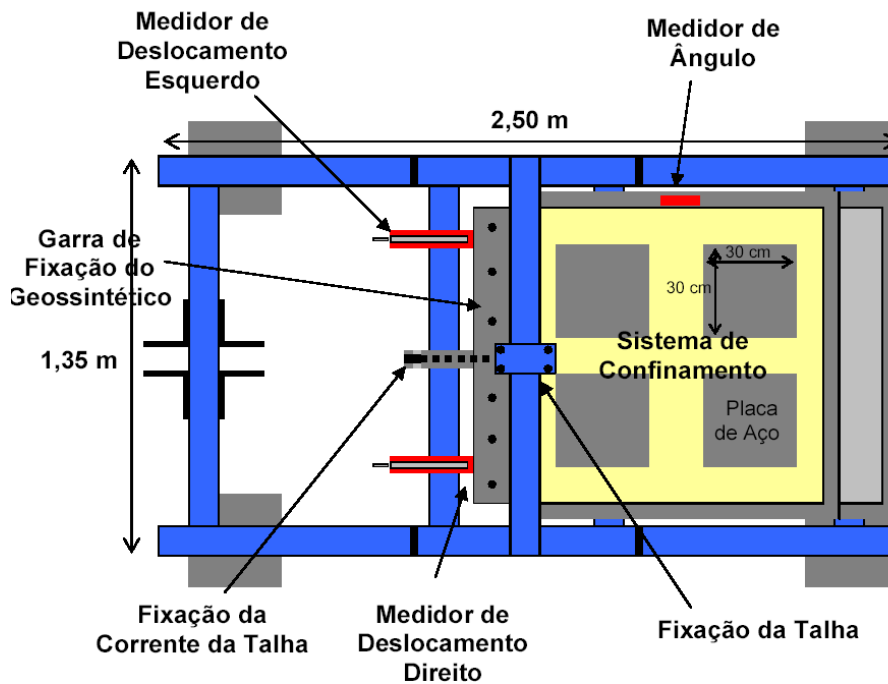


Figura 276 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-5 (vista superior).

Configuração de ensaio de Rampa RP100Q-10

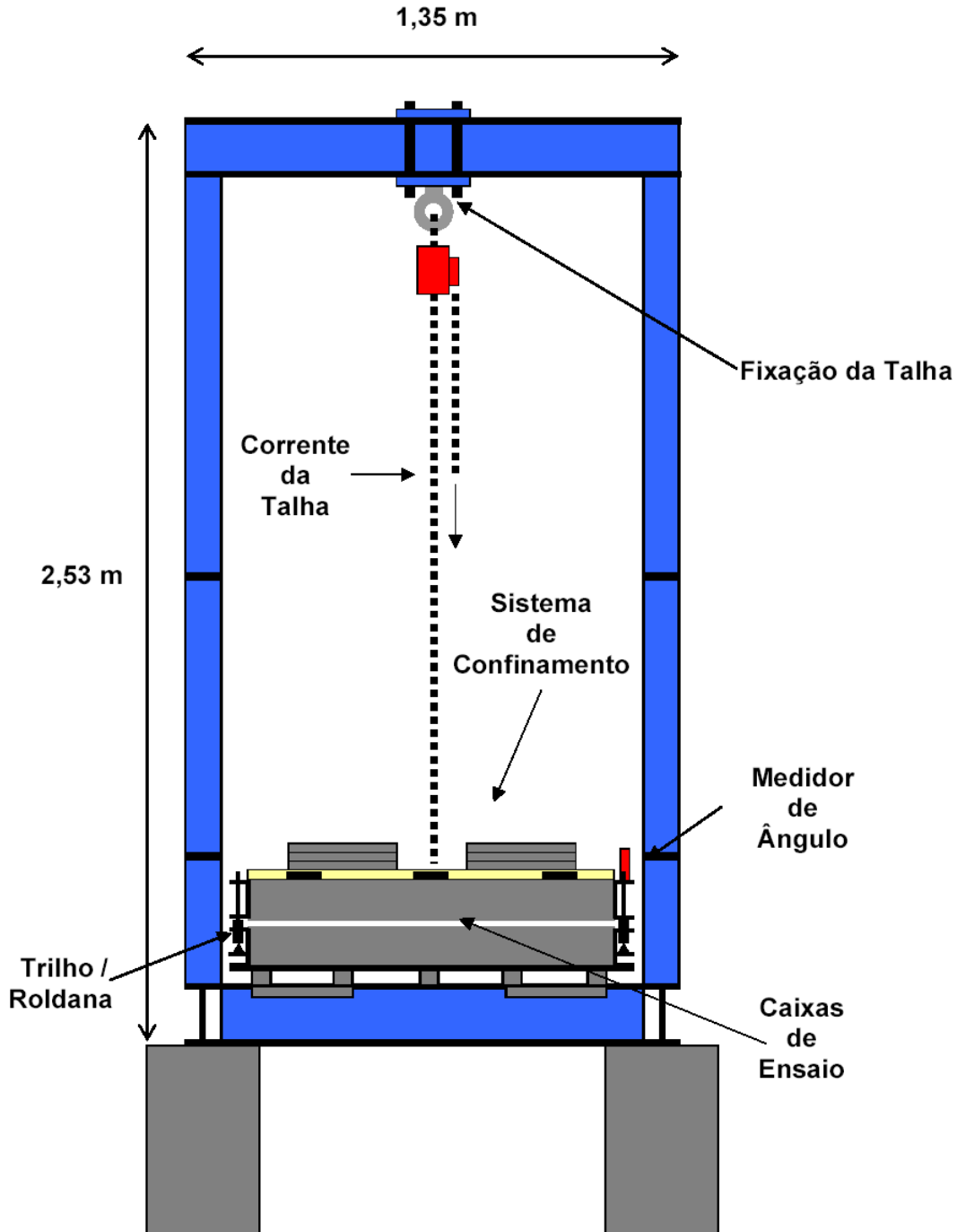


Figura 277 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-10 (vista frontal).

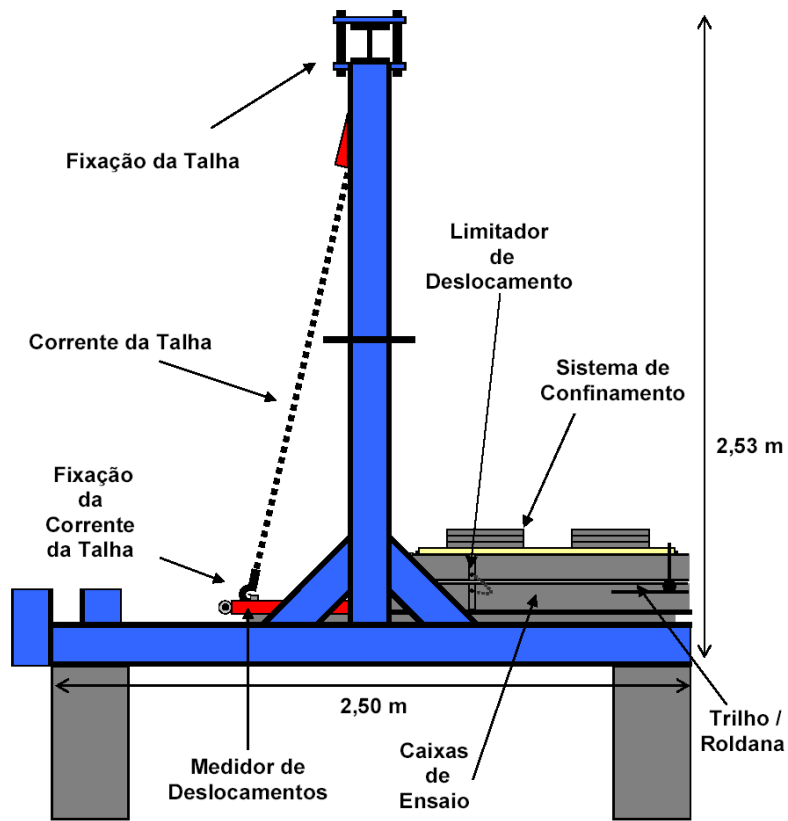


Figura 278 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-10 (vista lateral).

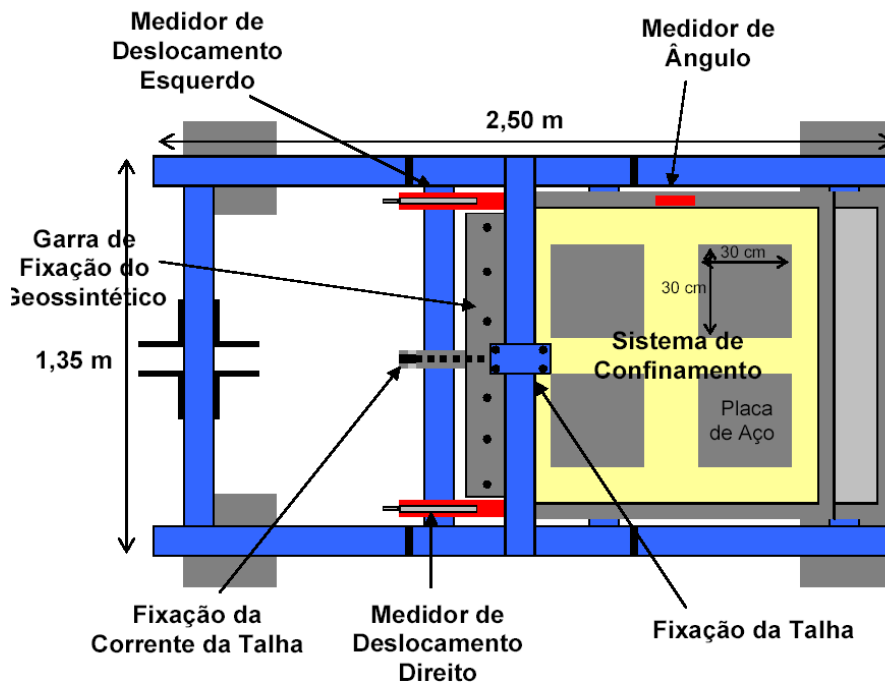


Figura 279 - Configuração de ensaio de rampa RP100Q-10 (vista superior).

Apêndice II. Configurações de Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

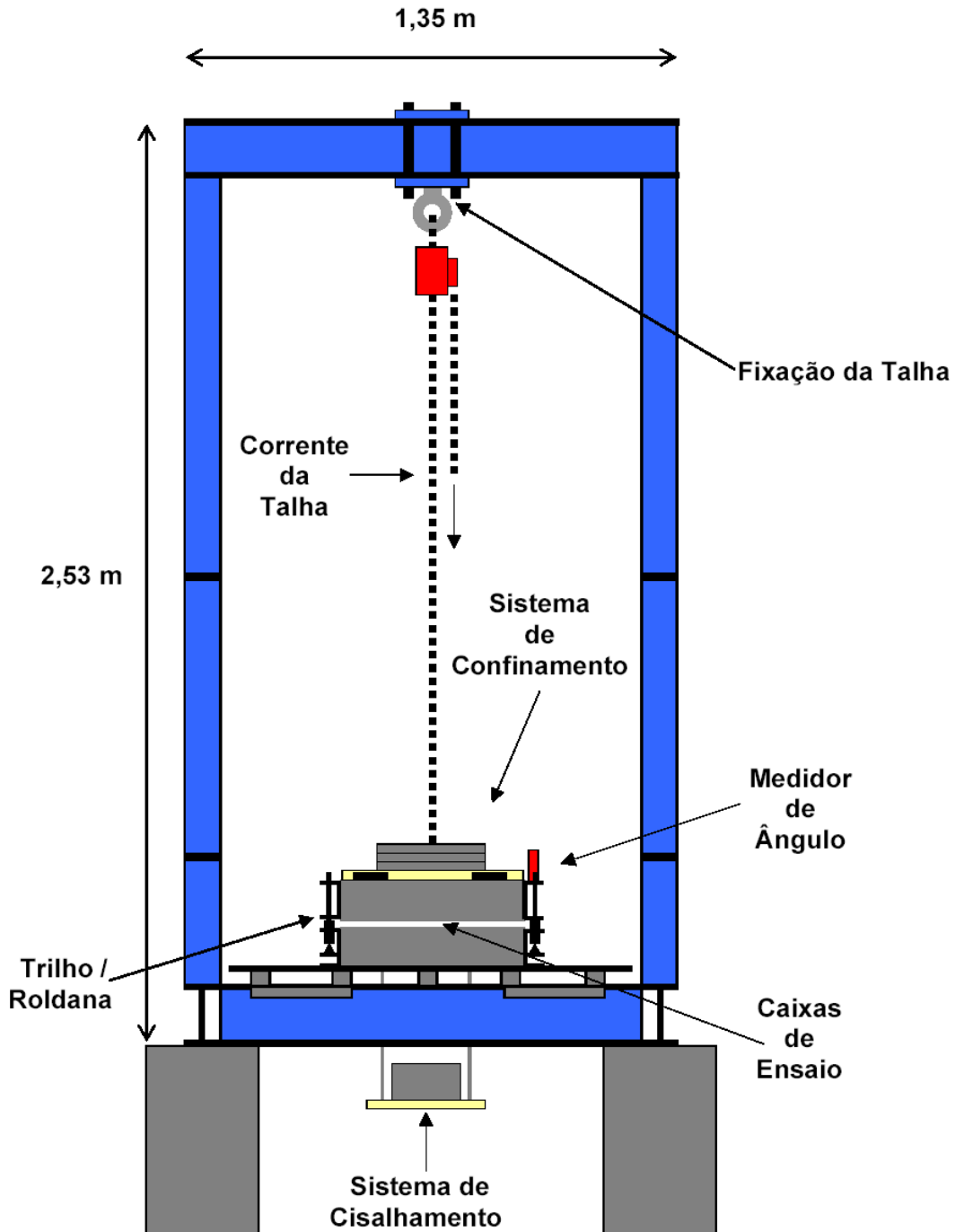
Características das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado

Tabela 67 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado

Características		Configuração de Ensaio		
		CI25Q-10	CI50R-10	CI100Q-10
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,50	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	1,00	1,00
	largura (m)	0,50	0,50	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	1,00
Velocidade de Ensaio (mm/min)		(*)	(*)	(*)
Medições	ângulo (°)	sim	sim	sim
	deslocamento (mm)	sim	sim	sim
	carga horizontal (kN)	não	não	não
	carga vertical (kN)	não	não	não
Sistema de Aplicação de Carga Confinante	Direta	sim	sim	sim
	Pendural	não	não	não
	Bolsa de Ar	não	não	não
Sistema de Aplicação de Carga Cisalhante	Pesos	sim	sim	sim
	Hidráulica	não	não	não
FACES de frente e fundo da caixa superior	V	sim	sim	sim
	I	sim	sim	não

(*) não se aplica, a este ensaio.

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado CI25Q-10



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 280 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI25Q-10 (vista frontal).

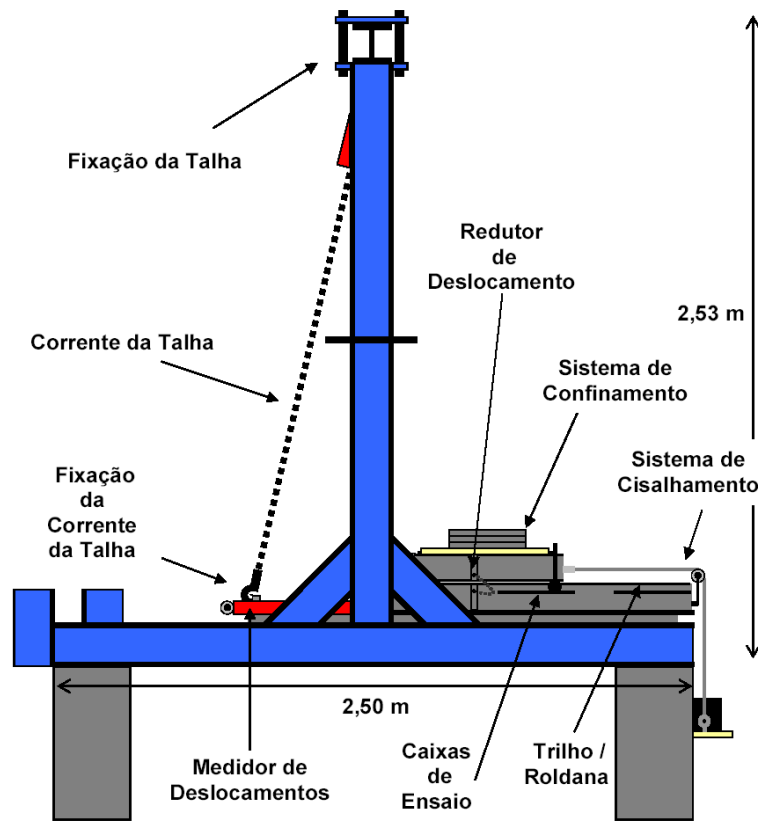


Figura 281 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI25Q-10 (vista lateral).

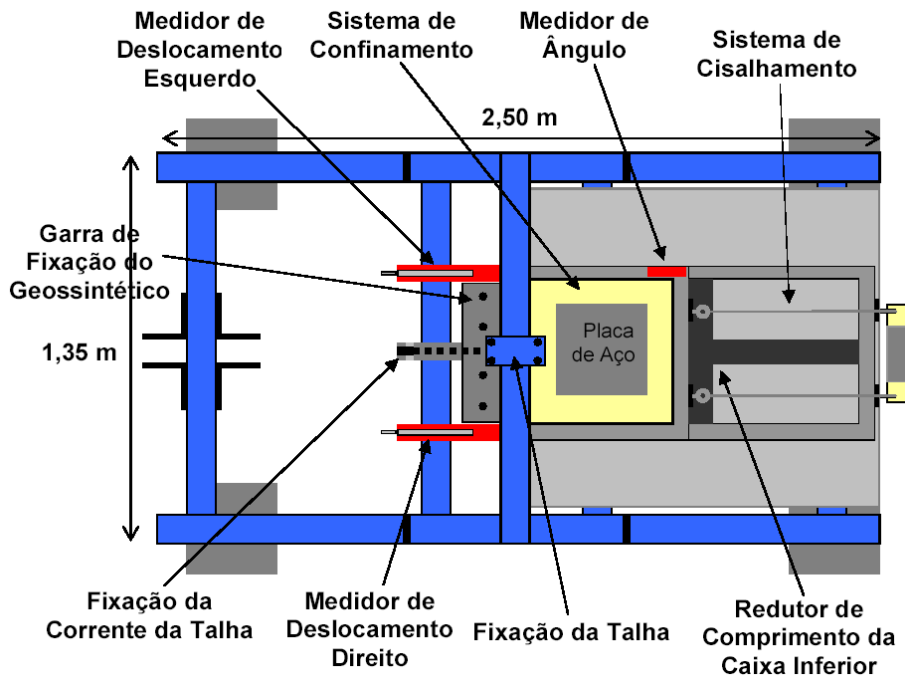
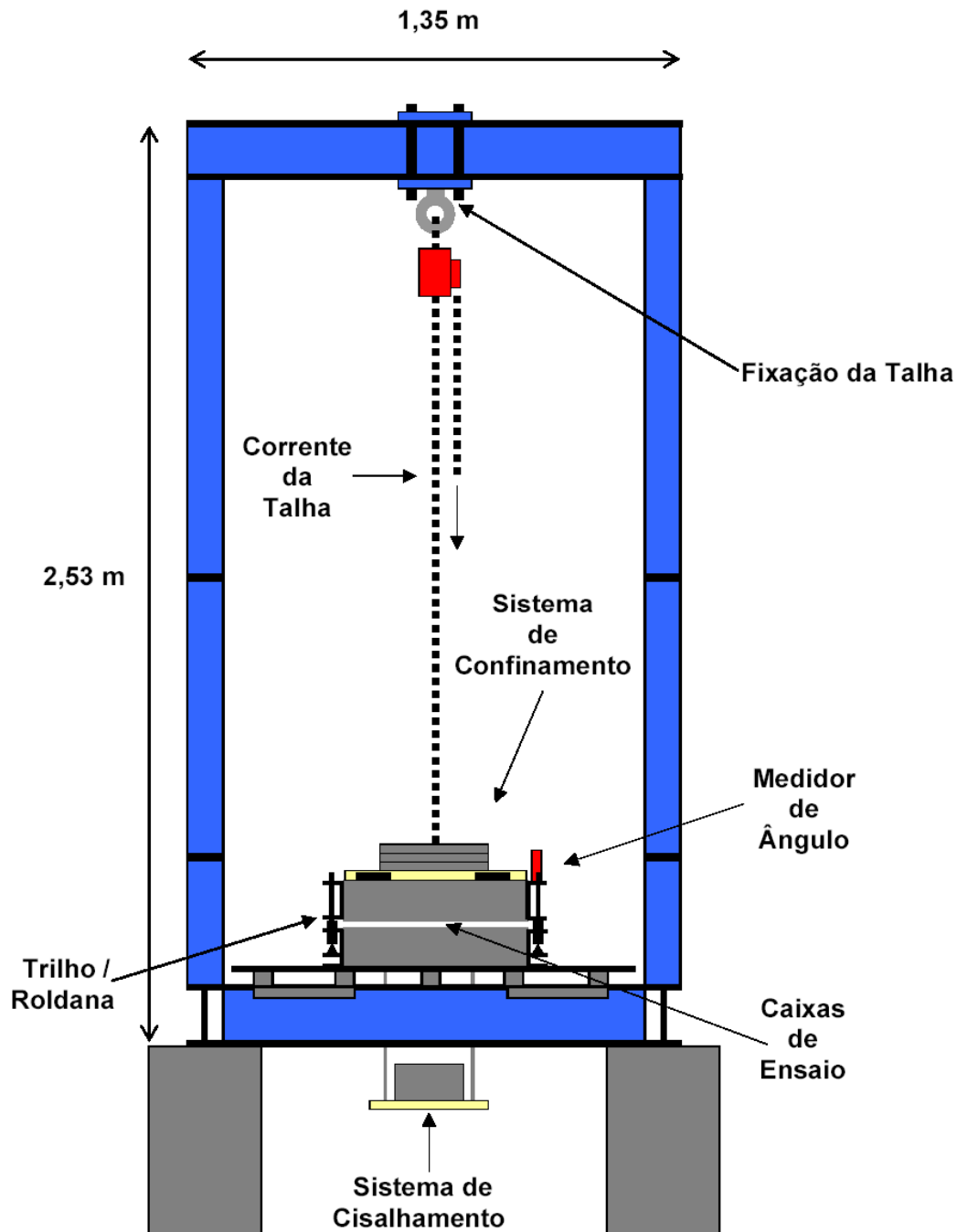


Figura 282 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI25Q-10 (vista superior).

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado CI50R-10



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 283 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI50R-10 (vista frontal).

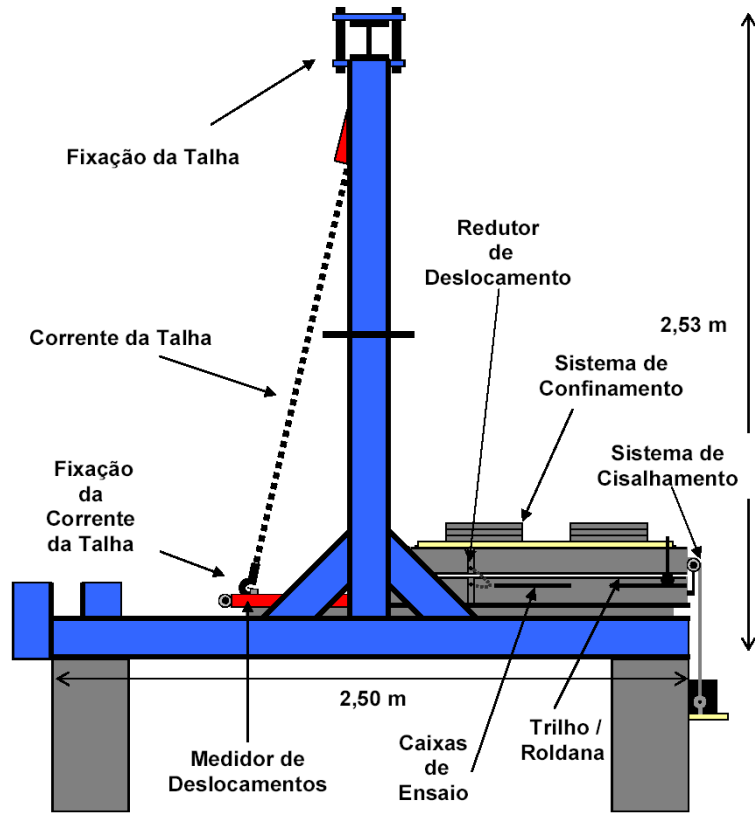


Figura 284 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI50R-10 (vista lateral).

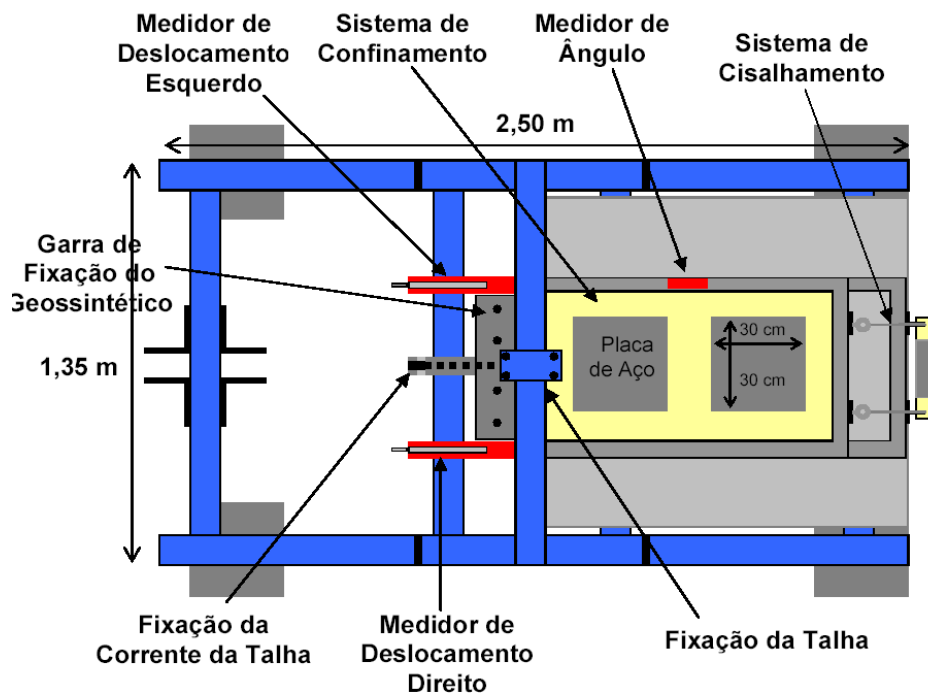


Figura 285 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI50R-10 (vista superior).

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado CI100Q-10

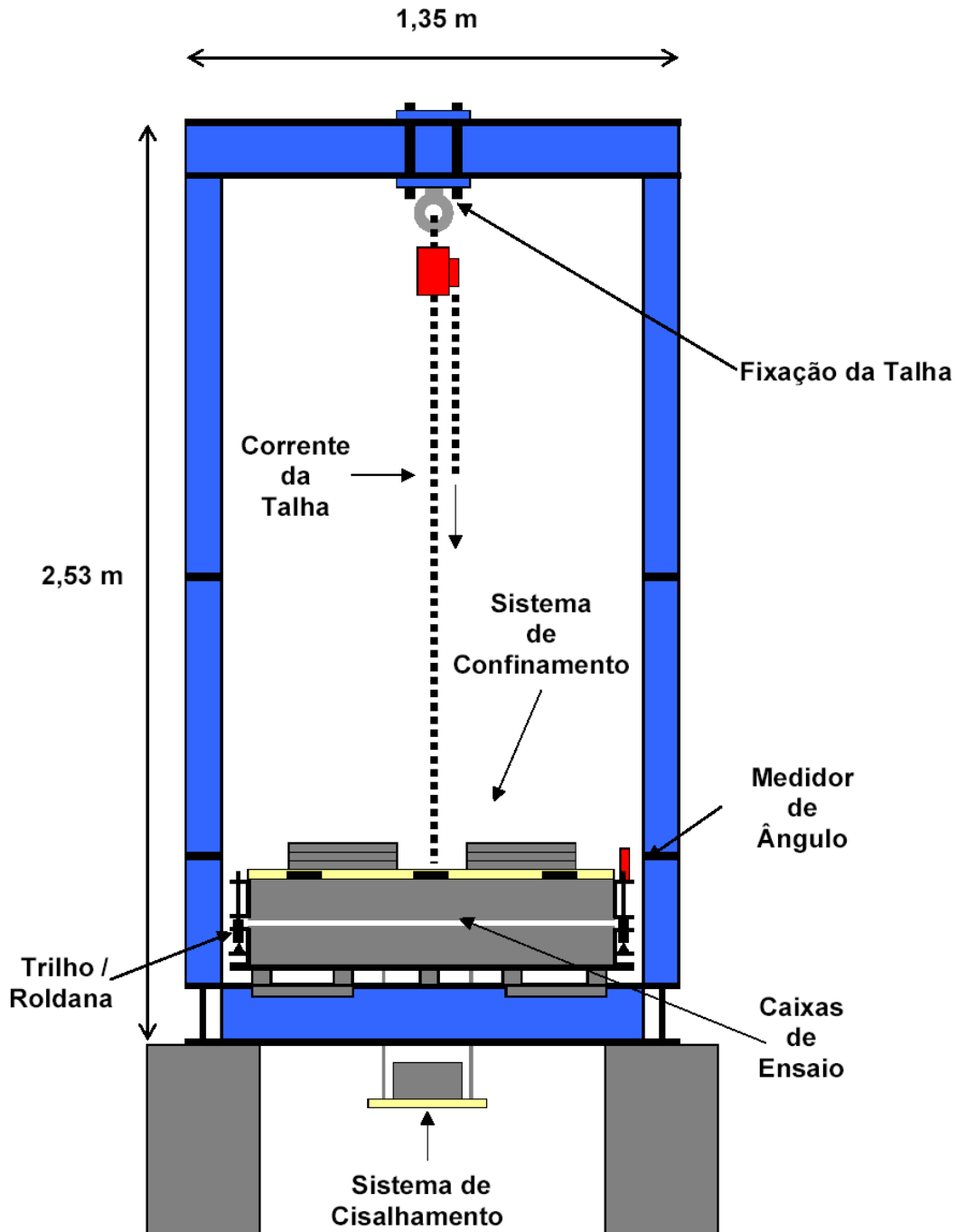


Figura 286 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI100Q-10 (vista frontal).

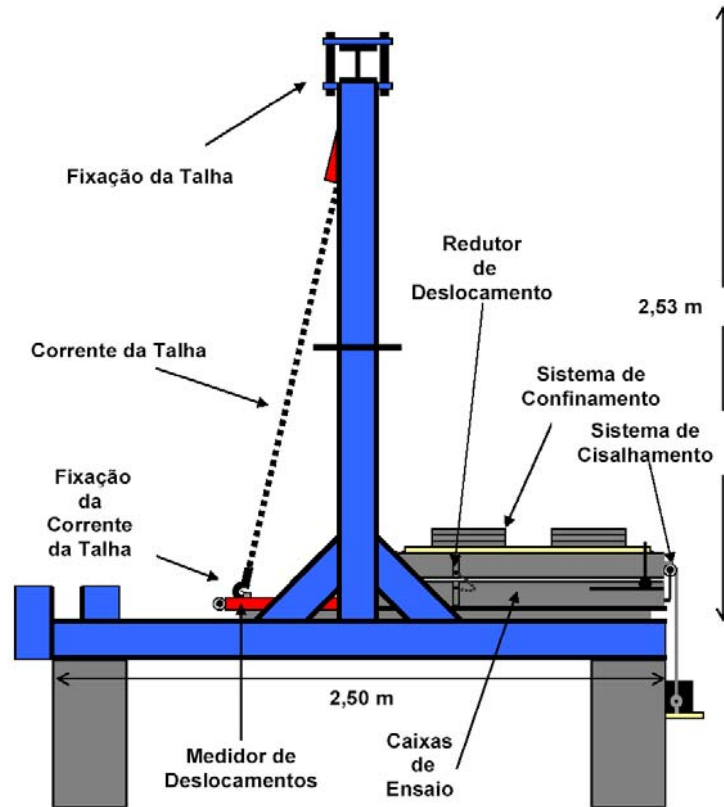


Figura 287 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI100Q-10 (vista lateral).

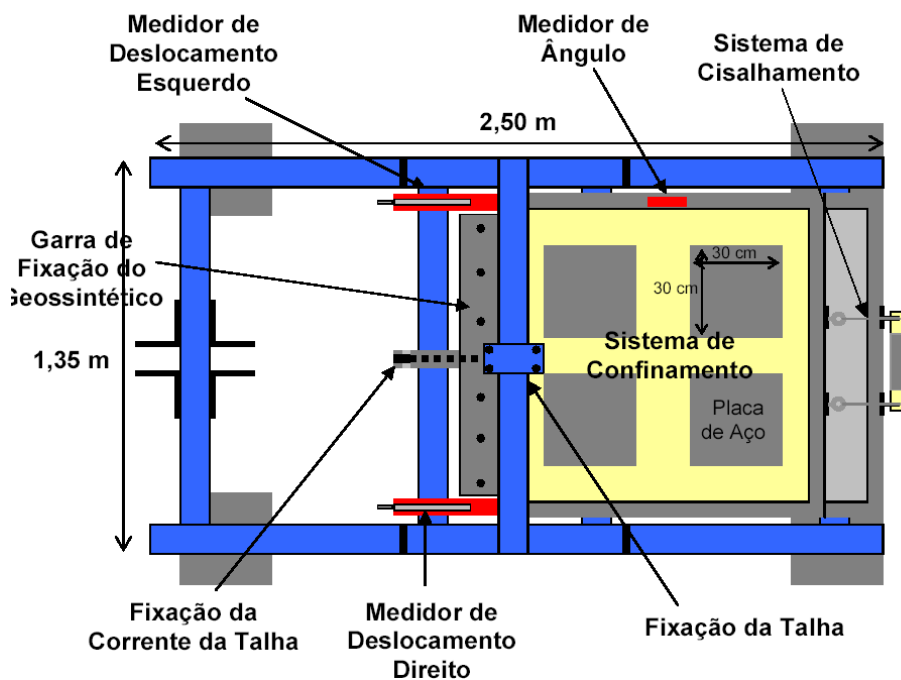


Figura 288 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto inclinado CI100Q-10 (vista superior).

Apêndice III. Configurações de Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

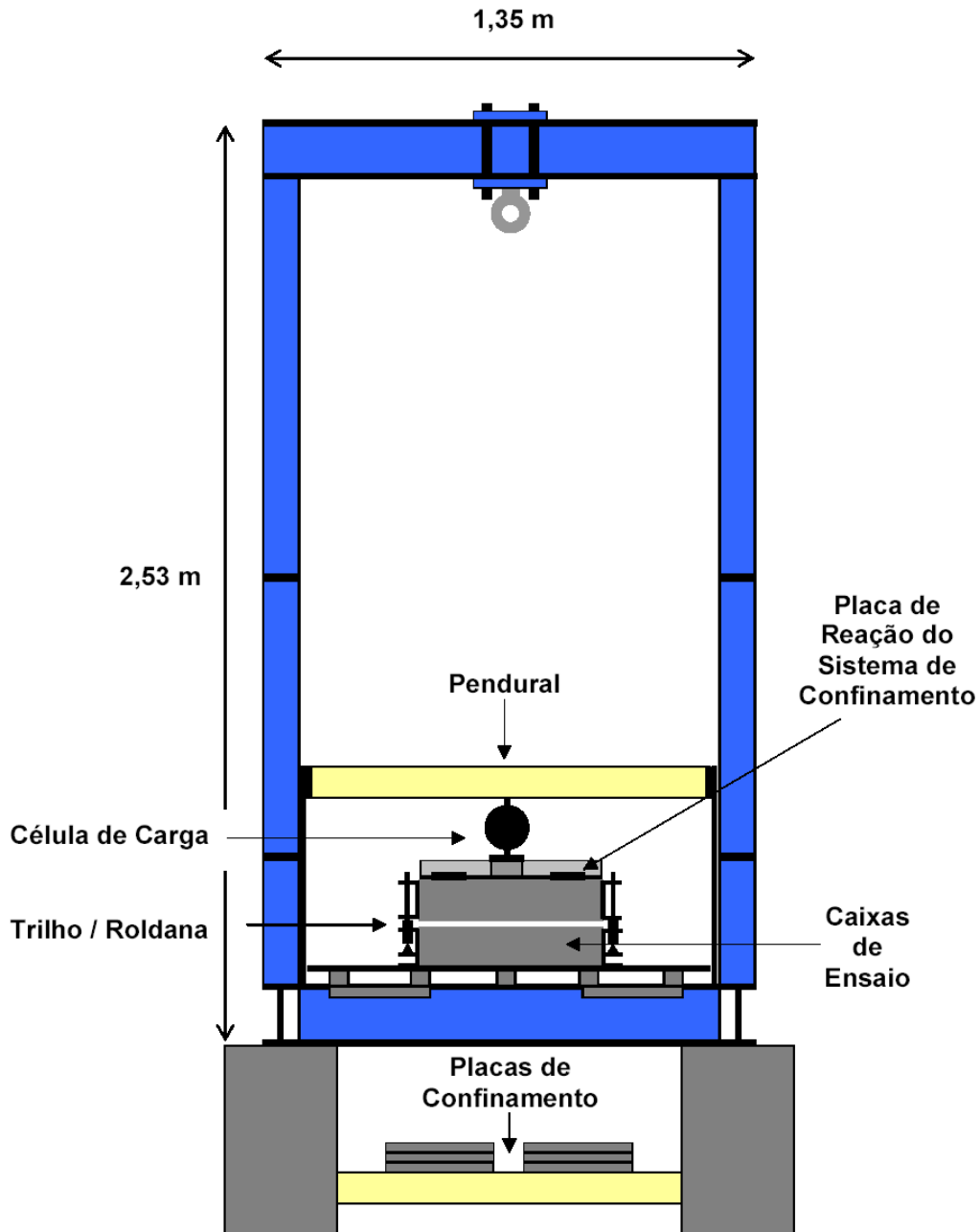
Características das configurações de ensaio de cisalhamento direto convencional

Tabela 68 - Resumo das características das configurações de ensaio de cisalhamento direto inclinado

Características		Configuração de Ensaio			
		CC25Q-10	CC50Q-10	CC100Q-10	CC120R-30
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	0,70	0,80	1,20	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,10	0,10	0,30
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	0,50	0,70	1,00	1,20
	largura (m)	0,50	0,70	1,00	1,00
	altura (m)	0,10	0,70	0,10	0,30
	área de contato (m ²)	0,25	0,50	1,00	1,20
Velocidade de Ensaio (mm/min)		(*)	(*)	(*)	(*)
Medições	ângulo (°)	não	não	não	não
	deslocamento (mm)	sim	sim	sim	sim
	carga horizontal(kN)	sim	sim	sim	sim
	carga vertical (kN)	sim	sim	não	não
Sistema de Aplicação de Carga	Direta	sim	sim	sim	sim
	Pendural	sim	sim	não	não
Confinante	Bolsa de Ar	não	não	não	sim
Sistema de Aplicação de Carga Cisalhante	Pesos	não	não	não	não
	Hidráulica	sim	sim	sim	sim

(*) depende do tipo de solo utilizado no ensaio.

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Convencional CC25Q-10



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 289 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC25Q-10 (vista frontal).

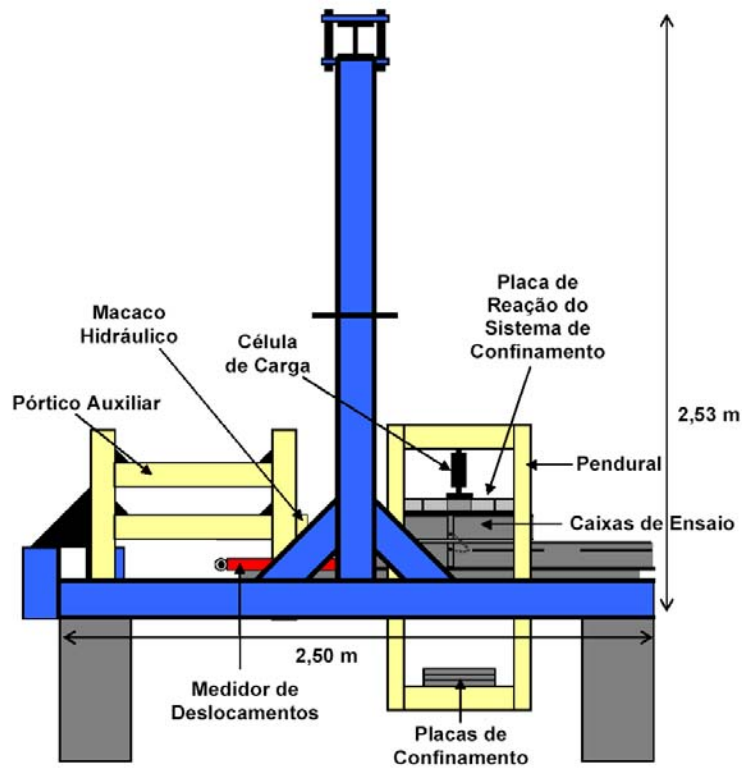


Figura 290 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC25Q-10 (vista lateral).

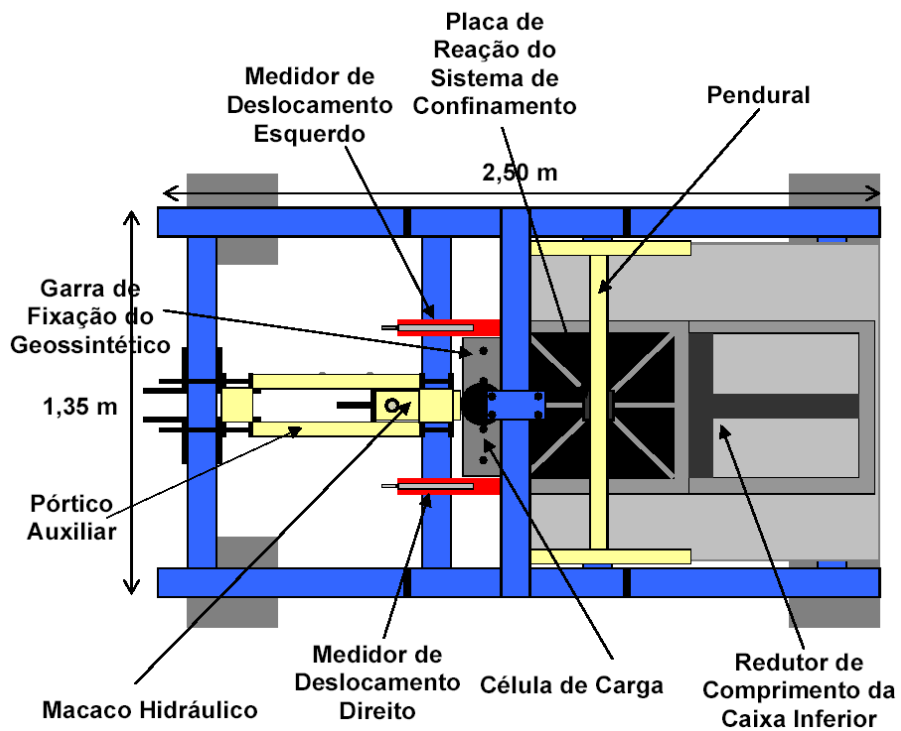


Figura 291 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC25Q-10 (vista superior).

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Convencional CC50Q-10

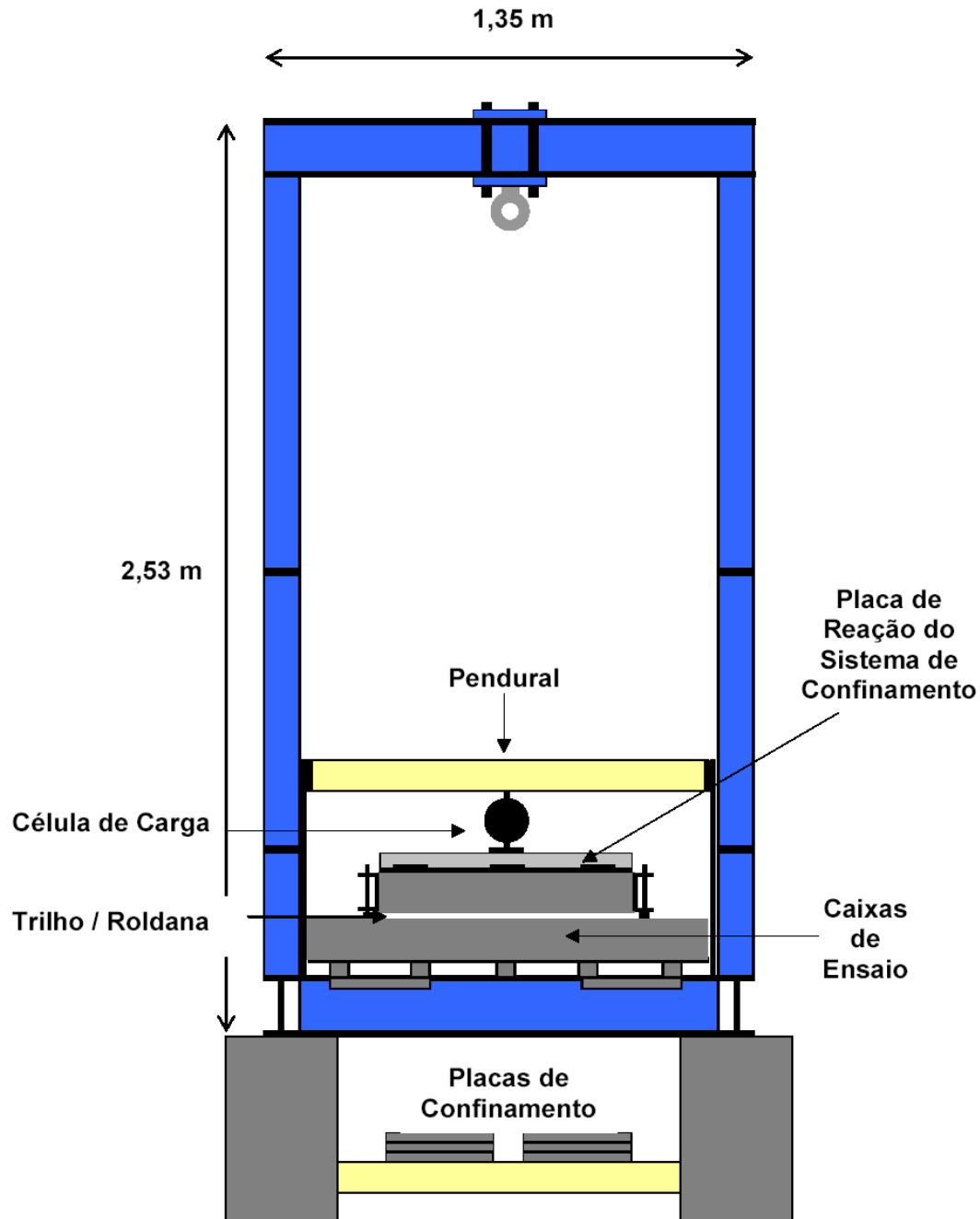


Figura 292 - Configuração de ensaio de cisalhamento direto convencional CC50Q-10 (vista frontal).

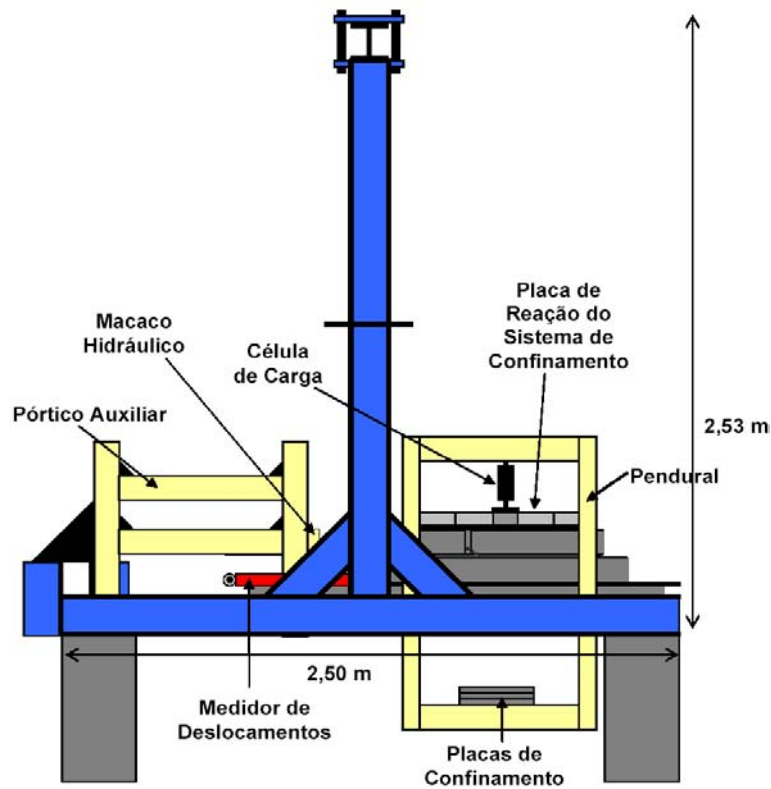


Figura 293 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

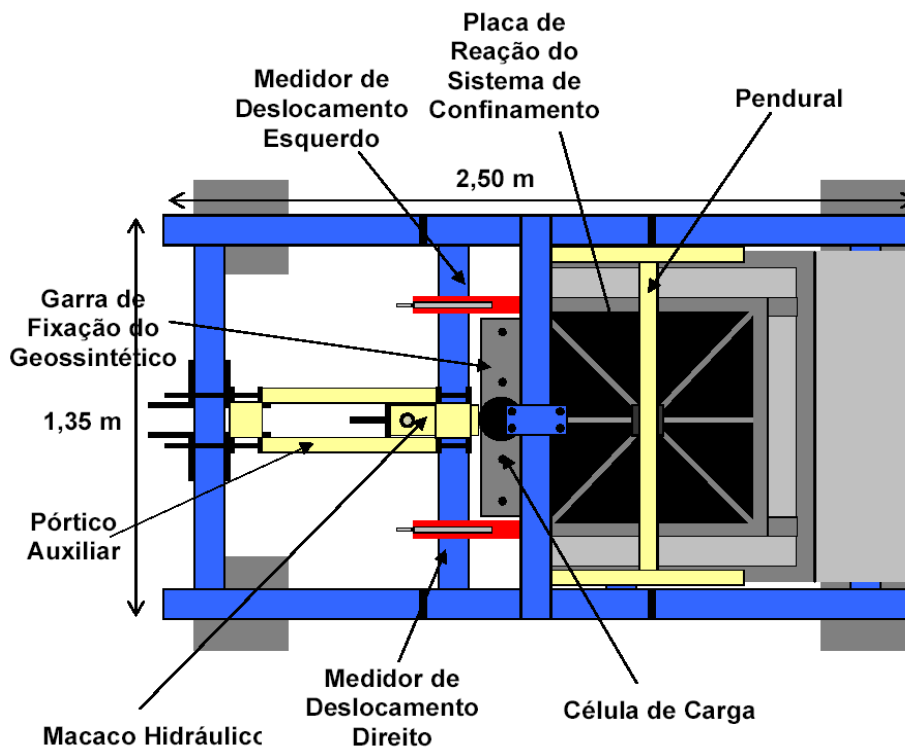


Figura 294 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Convencional CC100Q-10

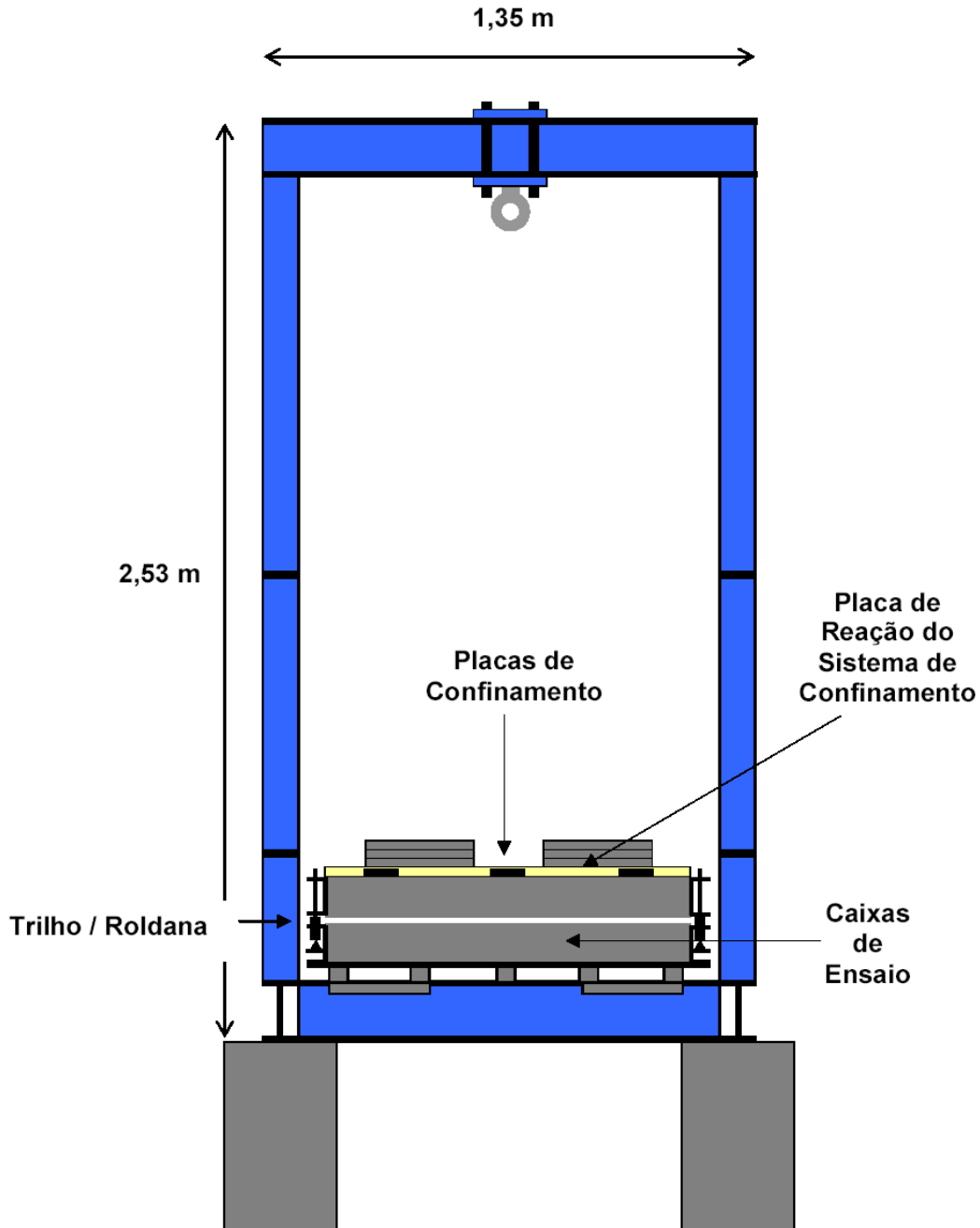


Figura 295 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC100Q-10.

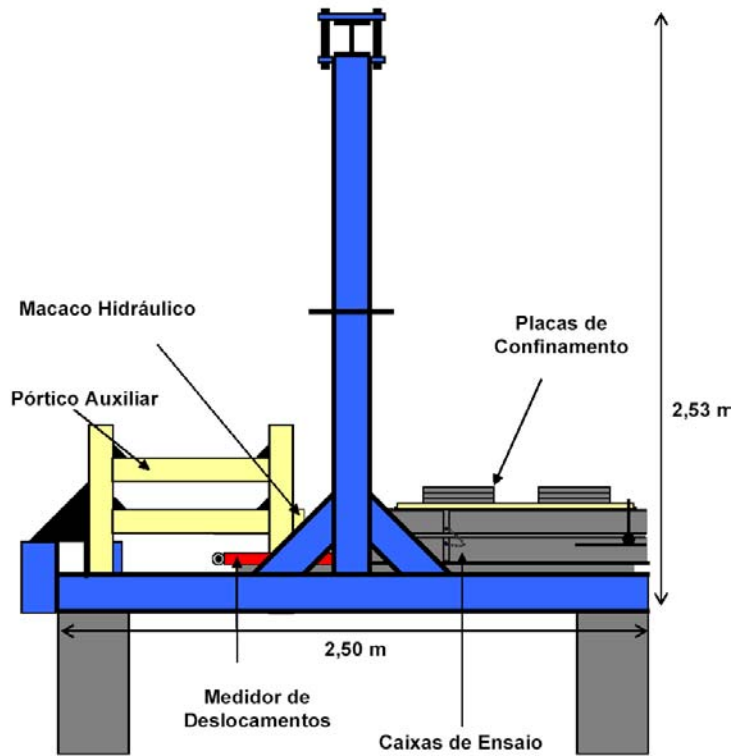


Figura 296 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

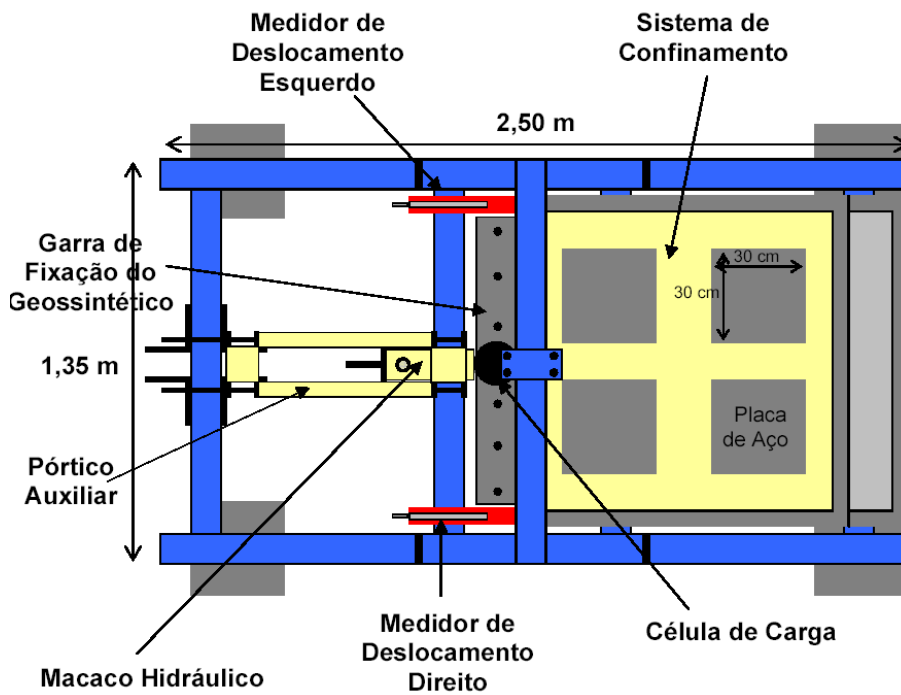
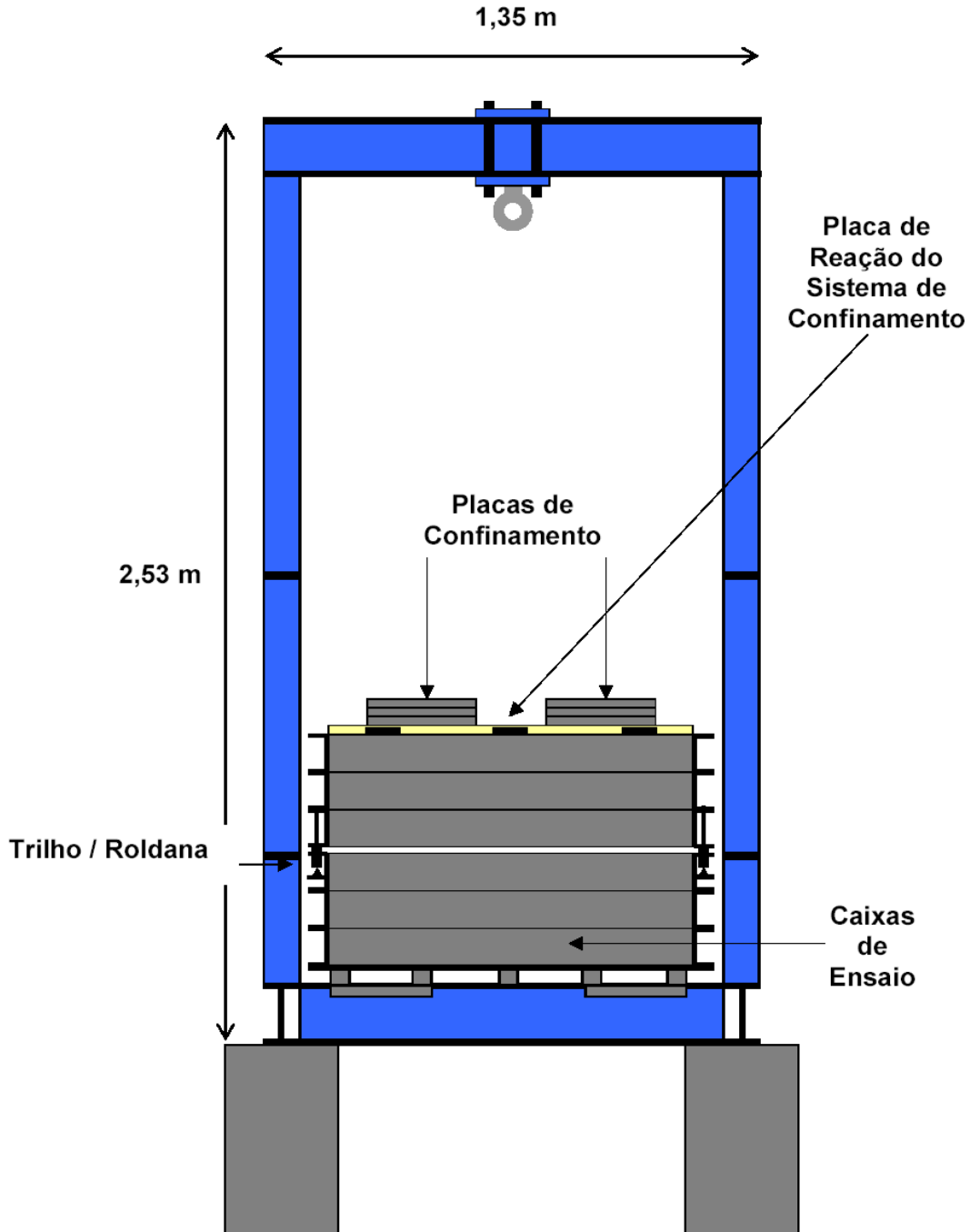


Figura 297 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC50Q-10.

Configuração de ensaio de Cisalhamento Direto Convencional CC120R-30



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321284/CA

Figura 298 - Vista frontal da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

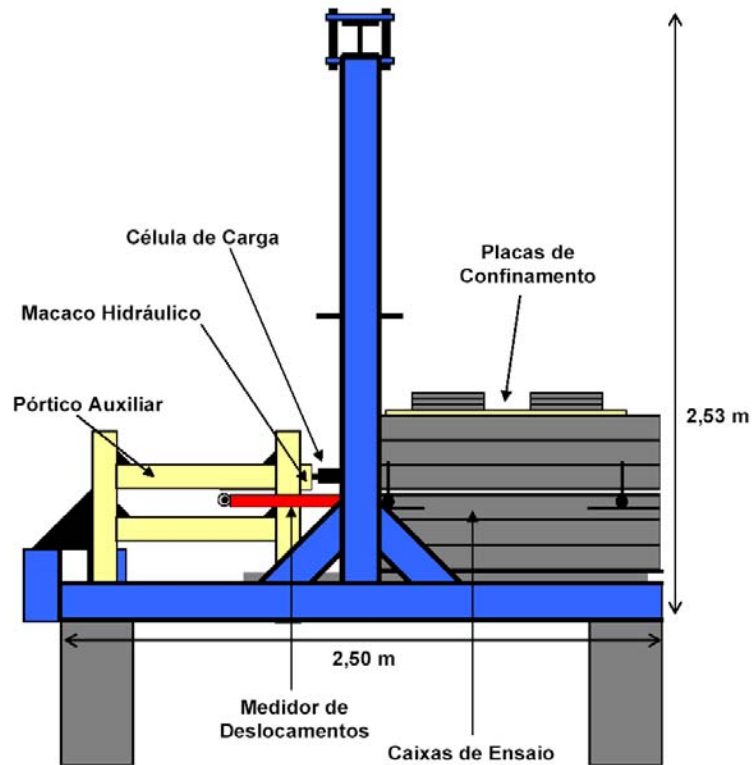


Figura 299 - Vista lateral da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

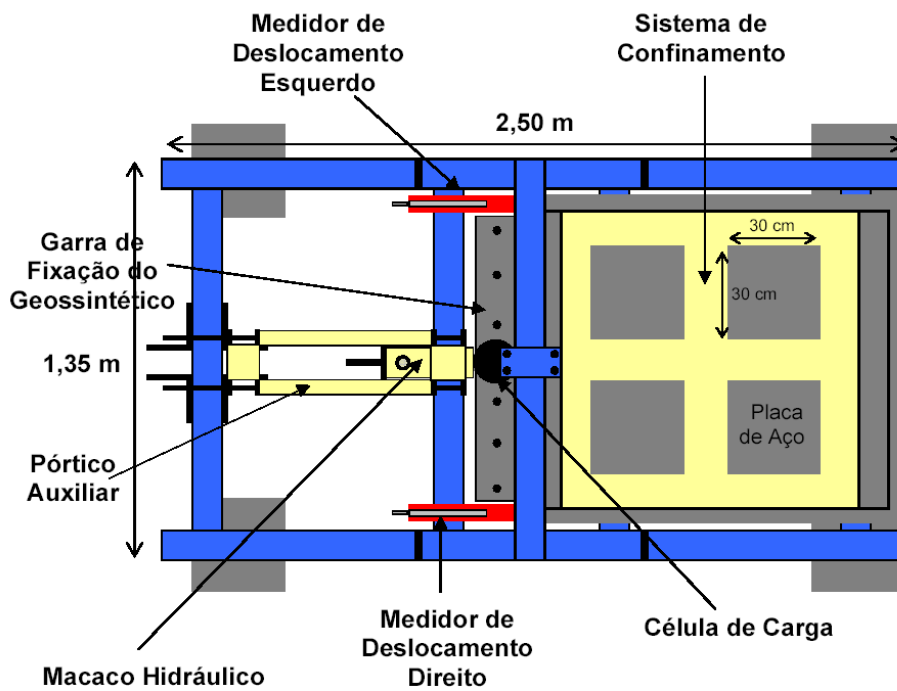


Figura 300 - Vista superior da configuração de cisalhamento direto convencional CC120R-30.

Apêndice IV. Configurações de Ensaio de Arrancamento

Características das configurações de ensaio de arrancamento

Tabela 69 - Resumo das características da configuração de ensaio de arrancamento

Características		Configuração de Ensaio
		AR120R-30
Caixas de Ensaio Inferior	comprimento (m)	1,20
	largura (m)	1,00
	altura (m)	0,30
Caixas de Ensaio Superior	comprimento (m)	1,20
	largura (m)	1,00
	altura (m)	0,30
	área de contato (m ²)	1,20
Velocidade de Ensaio (mm/min)		baixa, da ordem de 1mm/min
Medições	ângulo (°)	não
	deslocamento (mm)	sim
	carga horizontal (kN)	sim
	carga vertical (kN)	sim
Sistema de Aplicação de Carga Confinante	Direta	sim
	Pendural	não
	Bolsa de Ar	sim
Sistema de Aplicação de Carga Cisalhante	Pesos	não
	Hidráulica	sim

Configuração de ensaio de Arrancamento AR120R-30

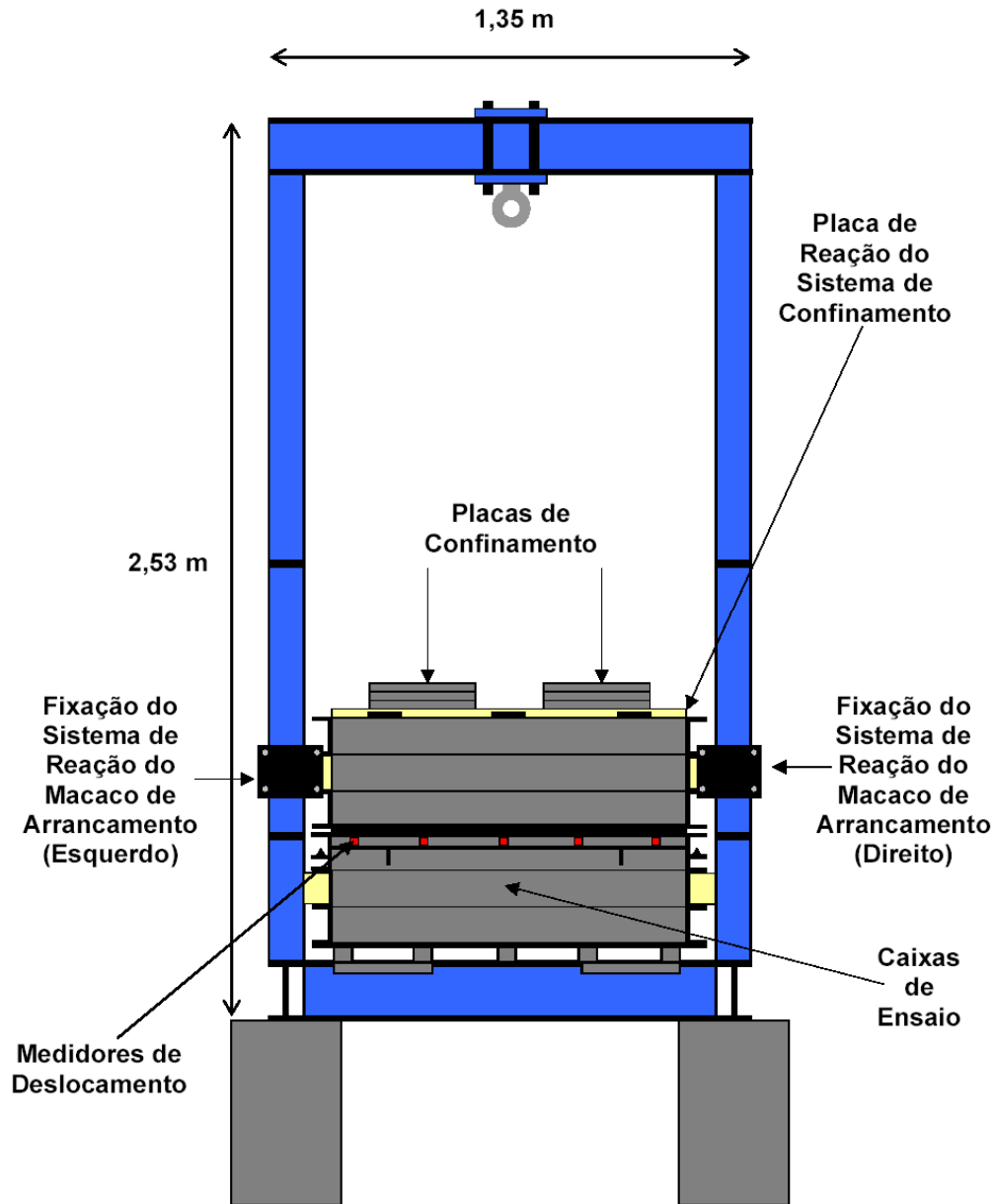


Figura 301 - Configuração de ensaio de arrancamento ArG-1 (vista frontal).

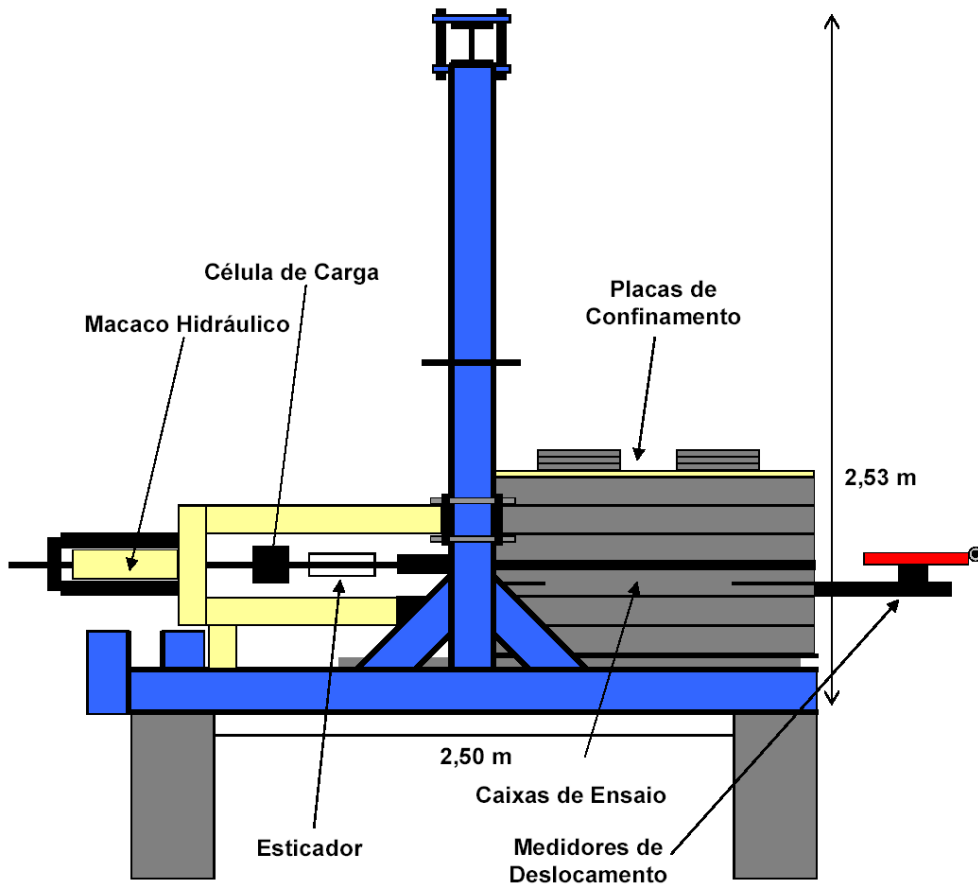


Figura 302 - Configuração de ensaio de arrancamento ArG-1 (vista lateral).

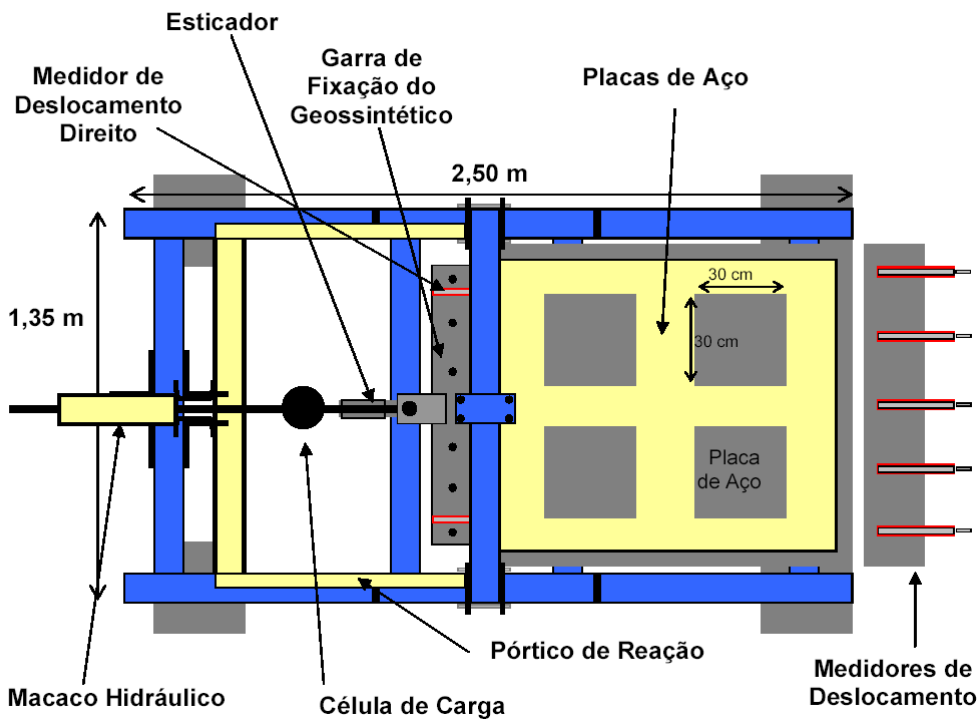


Figura 303 - Configuração de ensaio de arrancamento ArG-1 (vista superior).

Apêndice V. Limitações de Uso

Limites de utilização do conjunto de caixas de ensaio 1

configuração do sistema de confinamento			H (cm)
solo			5,0
solo	tampa		65,8
solo	tampa	1 placa	62,4
solo	tampa	2 placas	59,1
solo	tampa	3 placas	53,2

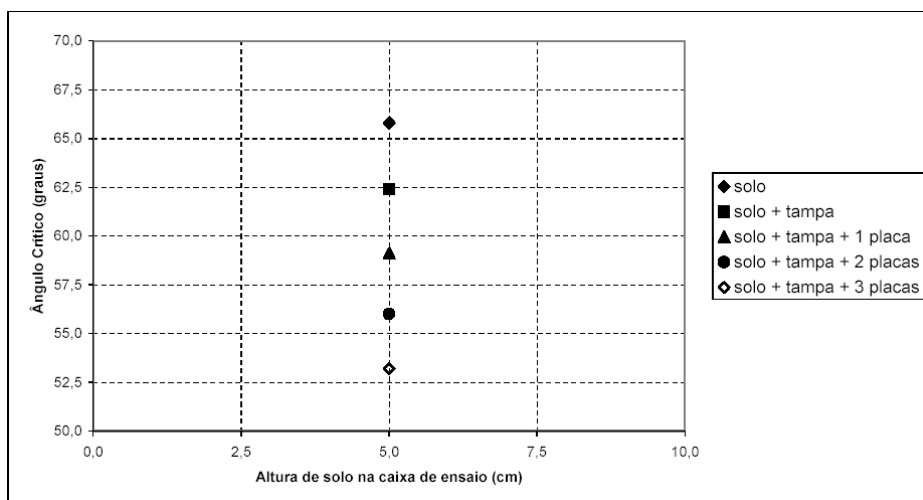


Figura 304 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 1

Limites de utilização do conjunto de caixas de ensaio 2

configuração do sistema de confinamento			H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
			2,5	5,0	7,5	10
solo			36,5	33,3	31,1	28,9
solo	tampa		33,6	31,2	29,1	27,0
solo	tampa	1 placa	31,2	29,1	27,1	25,4
solo	tampa	2 placas	29,0	27,1	25,4	24,0
solo	tampa	3 placas	27,1	25,4	24,0	22,6
solo	tampa	4 placas	25,4	24,0	22,6	21,3
solo	tampa	5 placas	24,0	22,6	21,3	20,2

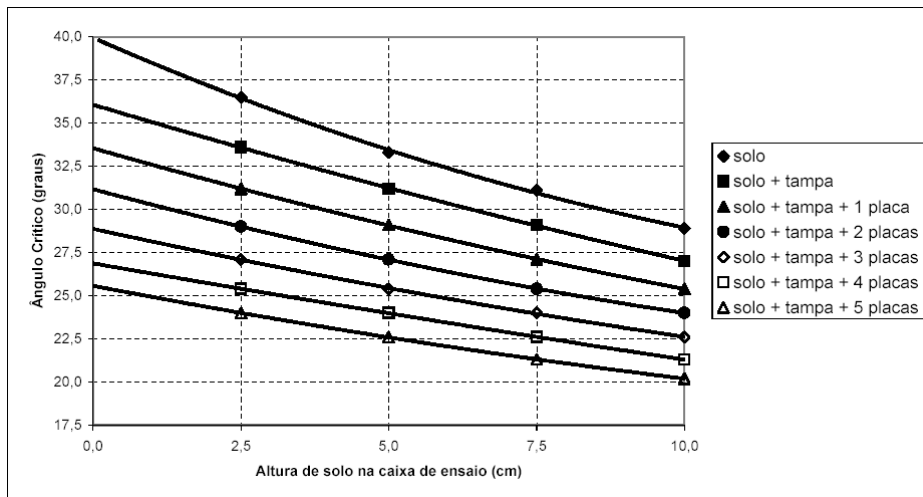


Figura 305 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 2

Limites de utilização do conjunto de caixas de ensaio 3

configuração do sistema de confinamento			H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
			2,5	5,0	7,5	10
solo			46,2	43,1	40,5	38,0
solo	tampa		43,1	40,5	38,0	35,9
solo	tampa	1 placa	40,5	38,0	35,9	33,8
solo	tampa	2 placas	38,0	35,9	33,8	32,0
solo	tampa	3 placas	35,9	33,8	32,0	30,4

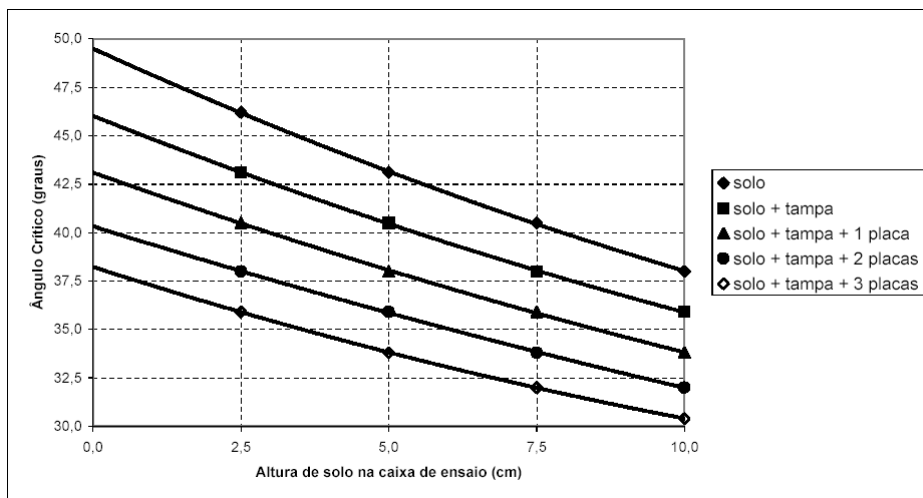


Figura 306 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 3

Limites de utilização do conjunto de caixas de ensaio 4

configuração do sistema de confinamento			H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
			2,5	5,0	7,5	10
solo			56,0	53,3	50,6	48,1
solo	tampa		53,3	50,6	48,1	45,8
solo	tampa	1 placa	50,6	48,1	45,8	43,7
solo	tampa	2 placas	48,1	45,8	43,7	41,7
solo	tampa	3 placas	45,8	43,7	41,7	39,9

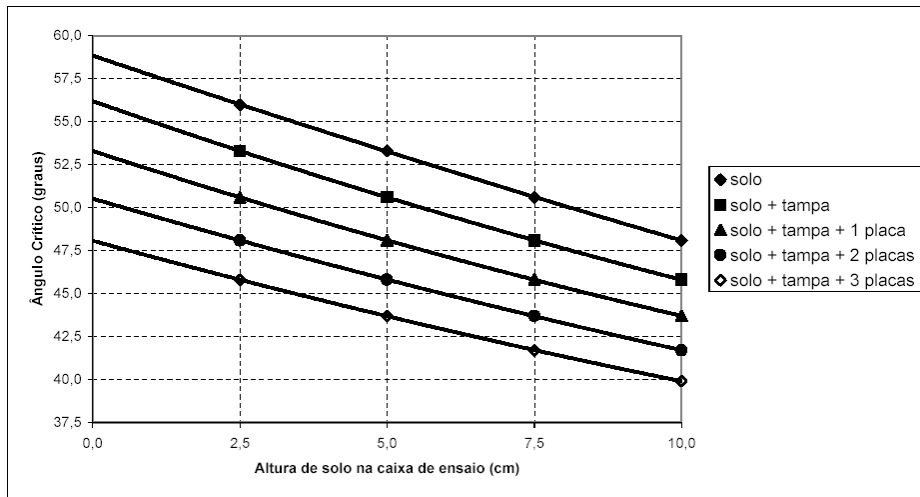


Figura 307 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 4

Limites de utilização do conjunto de caixas de ensaio 5

configuração do sistema de confinamento			H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
			2,5	5,0	7,5	10
solo			56,0	53,3	50,6	48,1
solo	tampa		53,3	50,6	48,1	45,8
solo	tampa	1 placa	50,6	48,1	45,8	43,7
solo	tampa	2 placas	48,1	45,8	43,7	41,7
solo	tampa	3 placas	45,8	43,7	41,7	39,9

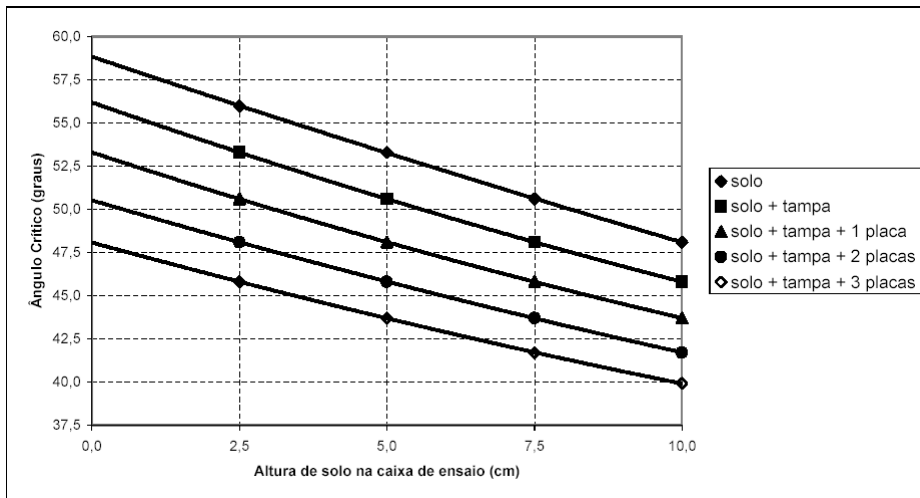


Figura 308 - Ângulo crítico ao tombamento - conjunto 5

Apêndice VI. Aguiar (2003)

Materiais Utilizados

No programa experimental foram utilizados um solo silto-argiloso e três tipos distintos de materiais geossintéticos: uma geogrelha de poliéster, um geotêxtil não-tecido) e uma geomembrana de PVC.

O solo é proveniente da obra de construção de diques de contenção de rejeitos em Poços de Caldas, Minas Gerais (Becker, 2003). Foi caracterizado como um solo silto-argiloso que apresenta mais de 70% dos seus grãos passando pela peneira 200 (0,075mm), conforme indica a Figura 309.

A Tabela 70 apresenta as principais características físicas do solo estudado, assim como as respectivas normas utilizadas nos ensaios de caracterização.

Tabela 70 - Características físicas do solo silto-argiloso

Características	Valor	Norma
Limite de Liquidez (LL)	55,3%	NBR 6459
Limite de Plasticidade (LP)	37,8%	NBR 7180
Índice de Plasticidade (IP)	17,5%	NBR 7180
Peso Específico Real dos Grãos (ρ_s)	28,0kN/m ³	NBR 6508
Peso Específico Seco Máximo (ρ_d)	13,6kN/m ³	NBR 7182
Teor de Umidade Ótimo (ω_{ot})	31,1%	NBR 7182
Coeficiente de Uniformidade (Cu)	3,7	NBR 7181

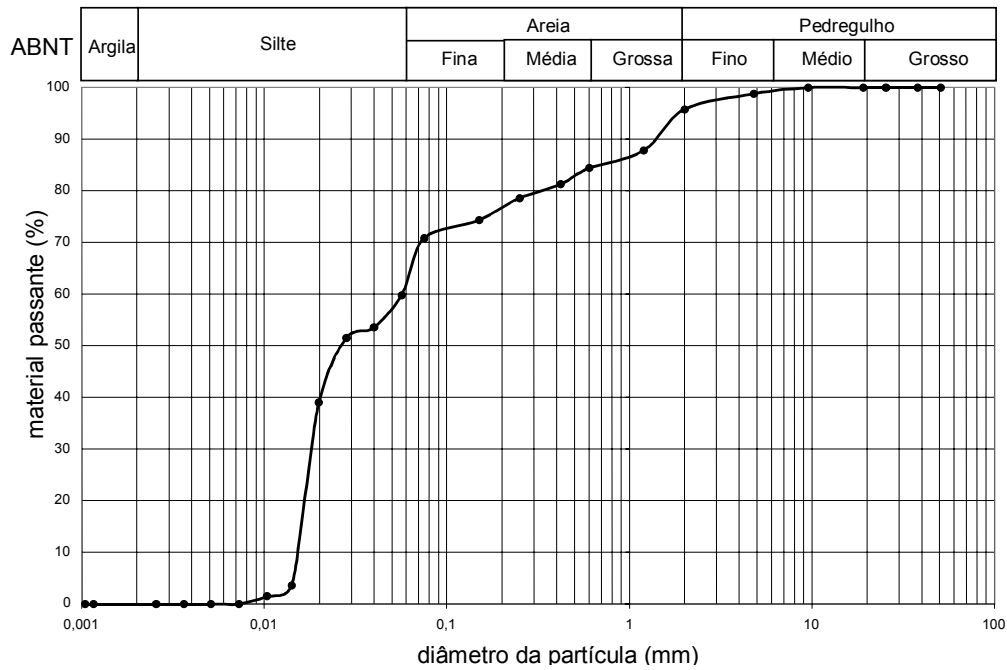


Figura 309 - Curva granulométrica do solo silto-argiloso.

Na Figura 310 é apresentada a envoltória de resistência de um conjunto de ensaios de cisalhamento direto com o solo silto-argiloso. Os corpos de prova foram obtidos de um bloco indeformado, retirado de um aterro experimental montado ao lado dos diques de rejeitos. O aterro foi compactado com umidade 2% acima da ótima. Os ensaios foram executados na condição de umidade natural, utilizando-se corpos de prova quadrados de 10,6cm de aresta por 2,0cm de altura.

Os parâmetros de resistência obtidos da envoltória, mostrados na Figura 4.2, são 43,8° de ângulo de atrito e 12,3kPa de coesão.

Os geossintéticos são o geotêxtil utilizado no programa experimental corresponde ao Geofort G300 (Figura 311a). É um geotêxtil não tecido agulhado de filamentos de polipropileno, fabricado pela Ober S.A. Indústria e Comércio. A Tabela 71 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

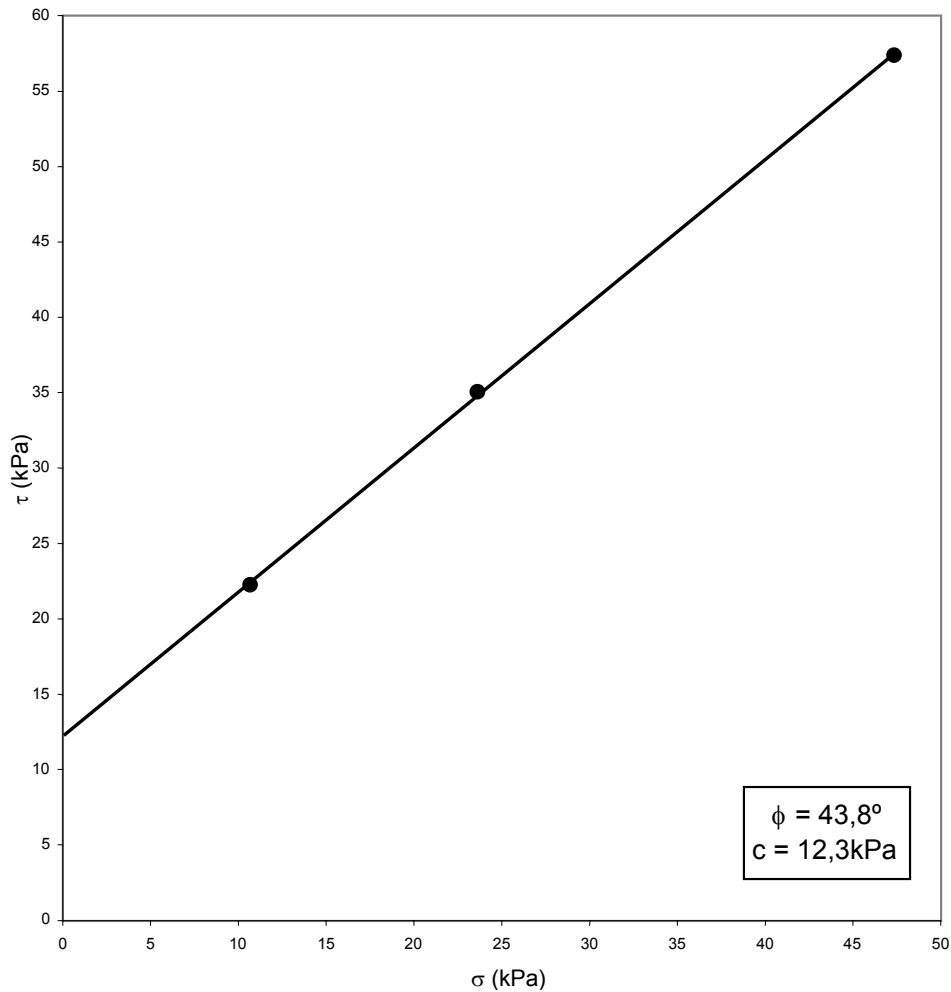


Figura 310 - Envoltória de resistência obtida dos ensaios de cisalhamento direto (Becker, 2003).

A geogrelha utilizada foi a Fortrac 55/25-20/30 (Figura 311b), constituída de poliéster de alta tenacidade revestida com PVC, fabricada pela Huesker. A Tabela 72 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

A geomembrana utilizada foi a CipaGeo (Figura 311c), de PVC, texturizada em uma das faces, fabricada pela Cipatex. A Tabela 73 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

Tabela 71 - Características do geotêxtil Geofort G300 (Ober, 1999)

Característica	Valor	Norma
Gramatura	300g/m ²	NBR 12592
Espessura Nominal	2,8mm	NBR 12569
Abertura de Filtração	110mm	AFNOR G 38017
Porosidade	90%	DIN 53855
Permeabilidade Normal	0,4 cm/s	AFNOR G 38016
Permissividade	1,4 s ⁻¹	AFNOR G 38016
Resistência à Tração (carga distribuída)	22kN/m	NBR 12824
Alongamento na Ruptura	60%	NBR 12824
Resistência ao Puncionamento	3,8kN	NBR 13359
Resistência ao Rasgo Trapezoidal	510N	ASTM D 4533
Resistência ao Estouro	3MPa	STM D 3786

Tabela 72 - Características da geogrelha Fortrac 55/25-20/30 (Huesker, 2002)

Característica	Valor	Norma	
Abertura	20mm x 30mm		
Resistência à Tração	Longitudinal	55 kN/m	NBR 12824
	Transversal	25 kN/m	NBR 12824
Alongamento na Ruptura (Longitudinal)	5%	NBR 12824	

Tabela 73 - Características da geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003)

Característica	Valor	Norma
Densidade	1200kg/m ³	ASTM D 792A
Gramatura	960g/m ²	NBR 12592
Espessura	0,8m	ASTM D 1593
Resistência ao Rasgo	35N	ASTM D1004
Resistência à Tração	10N/mm	ASTM D882
Alongamento na Ruptura	200%	ASTM D882
Módulo de Elasticidade	8MPa	ASTM D882

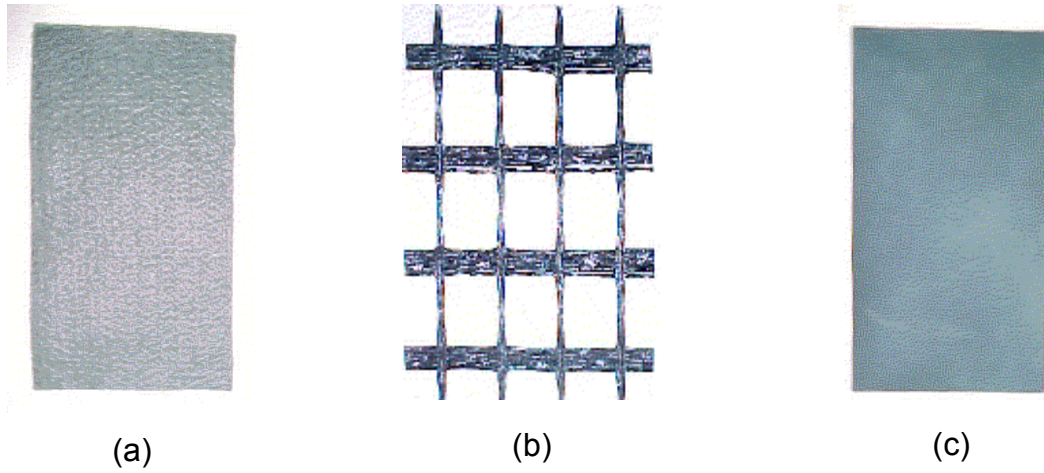


Figura 311 - Geossintéticos ensaiados: (a) Geotêxtil, (b) Geogrelha e (c) Geomembrana.

Apêndice VII. Rezende (2005)

Materiais Utilizados

No programa experimental foram utilizados dois solos não-coesivos e dois tipos distintos de materiais geossintéticos: uma geogrelha de poliéster e uma geomembrana de PVC.

Solos

Um dos objetivos da pesquisa é a calibração do equipamento. Para isso, foram utilizados dois solos distintos nas campanhas de ensaio, uma areia e uma brita, com curvas granulométricas diferentes no que diz respeito à dimensão das partículas para avaliar seu desempenho (Figura 312).

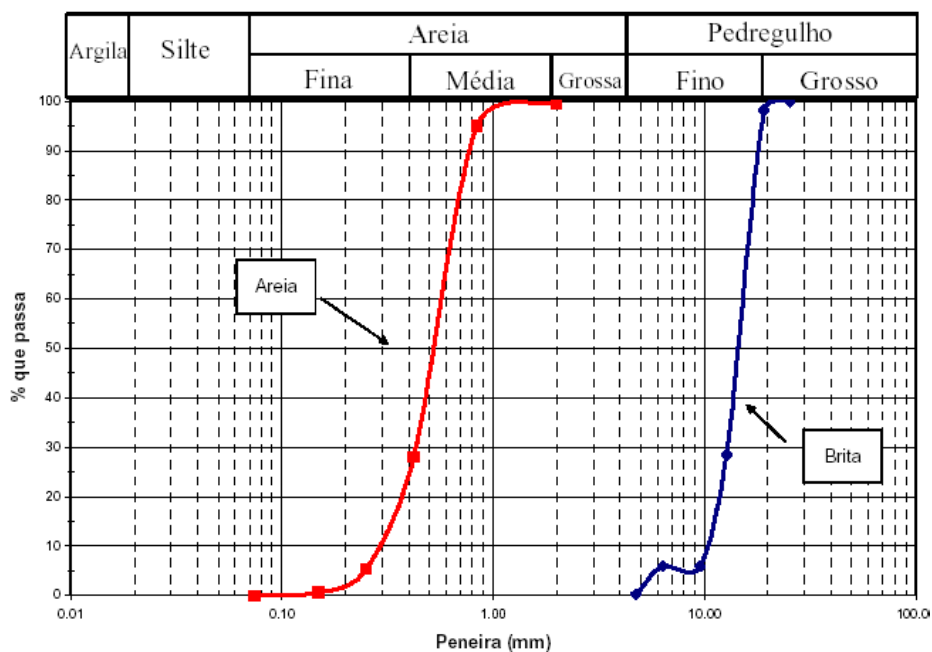


Figura 312 - Curva granulométrica da areia e da brita.

A areia é proveniente da praia de Ipanema (Figura 313). É uma areia uniforme de quartzo, com partículas de dimensões que variam entre 0,074 e 2,38mm. Os valores de peso específico mínimo e máximo são de 15,47 e 17,04kN/m³, respectivamente.

O segundo material é um pedregulho uniforme, proveniente de britagem de rocha granito-gnáissica que tem partículas com dimensões variando de 4,67 a 19,1mm (Figura 313). Os valores de peso específico mínimo e máximo são de 13,39 e 15,26kN/m³, respectivamente.

Nas Tabelas 74 e 75 encontram-se algumas das características dos dois materiais, como os diâmetros máximo ($D_{máx}$) e mínimo ($D_{mín}$), os diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c) e os pesos específicos máximo ($\gamma_{máx}$) e mínimo ($\gamma_{mín}$).



Figura 313 - Amostras representativas da areia (esquerda) e brita (direita).

Tabela 74 - Características granulométricas da areia e da brita

Solo	$D_{mín}$ (mm)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	$D_{máx}$ (mm)	C_u	C_c
areia	0,08	0,31	0,45	0,60	2,38	1,94	1,09
brita	4,67	10,5	14,0	16,3	19,1	1,55	1,15

Tabela 75 - Características físicas da areia e da brita

Solo	γ_s (kN/m ³)	$\gamma_{máx}$ (kN/m ³)	γ_{Dr} (kN/m ³)	$\gamma_{mín}$ (kN/m ³)	$e_{mín}$	e_{Dr}	$e_{máx}$
areia	26,09	17,04	15,69	15,47	0,53	0,66	0,69
brita	26,46	15,26	14,14	13,80	0,76		1,01

A seguir são apresentadas as envoltórias de resistência da areia para os estados fofo e denso. Não foi possível obter os parâmetros da brita por não dispor de um equipamento com dimensões adequadas.

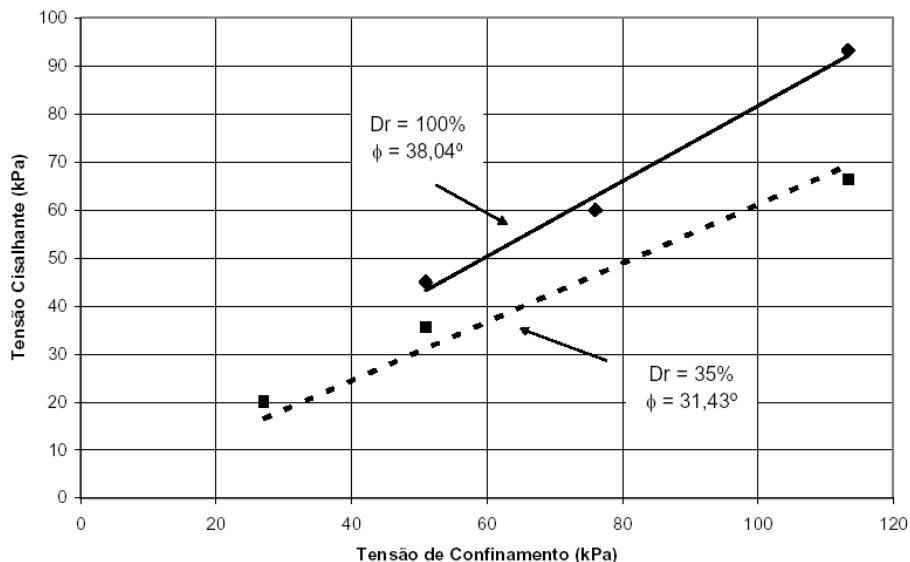


Figura 314 - Envoltórias de ruptura da areia.

Geossintéticos

Pala avaliar o desempenho do equipamento foram utilizados 2 geossintéticos: uma geomembrana de PVC e uma geogrelha.

A geomembrana de PVC foi a CipaGeo, texturizada em uma das faces, fabricada pela Cipatex (Figura 315). A Tabela 76 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

Tabela 76 - Características da geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003)

Característica	Valor	Norma
Densidade	1200kg/m ³	ASTM D 792A
Gramatura	960g/m ²	NBR 12592
Espessura	0,8m	ASTM D 1593
Resistência ao Rasgo	35N	ASTM D1004
Resistência à Tração	10N/mm	ASTM D882
Alongamento na Ruptura	200%	ASTM D882
Módulo de Elasticidade	8MPa	ASTM D882

A geogrelha empregada foi a Fortrac 35/25-20/30 fabricada pela Huesker (Figura 315). Ela é constituída de poliálcool de vinila (PVA) e suas características, segundo o fabricante, são apresentadas na Tabela 77.

Tabela 77 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2003)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Massa por Unidade de Área	270g/m ²	ASTM D-5261
Abertura	20 x 30mm	~
Porcentagem de Área Aberta	70 %	~
Resistência à Tração	Longitudinal	35kN/m
	Transversal	25kN/m
Alongamento na Ruptura (longitudinal)	4-6%	ASTM D-6637

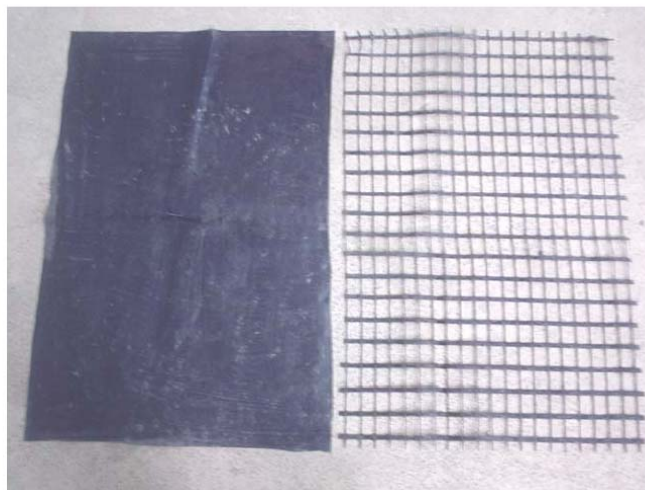


Figura 315 - Geossintéticos ensaiados: (a) Geomembrana, (b) Geogrelha.

Apêndice VIII. Tavares (2008)

Materiais da Pesquisa

No programa experimental foram utilizados dois solos, uma areia e um pedregulho, e quatro tipos distintos de materiais geossintéticos: uma geogrelha de poliéster, uma geogrelha de poliéster tridimensional, uma geomembra de PVC e uma geomembrana de PEAD.

Solos

Um dos objetivos da pesquisa é a calibração do equipamento. Para isso, foram utilizados dois solos distintos nas campanhas de ensaio, uma areia e uma brita, com curvas granulométricas diferentes no que diz respeito à dimensão das partículas para avaliar seu desempenho (Figura 316).

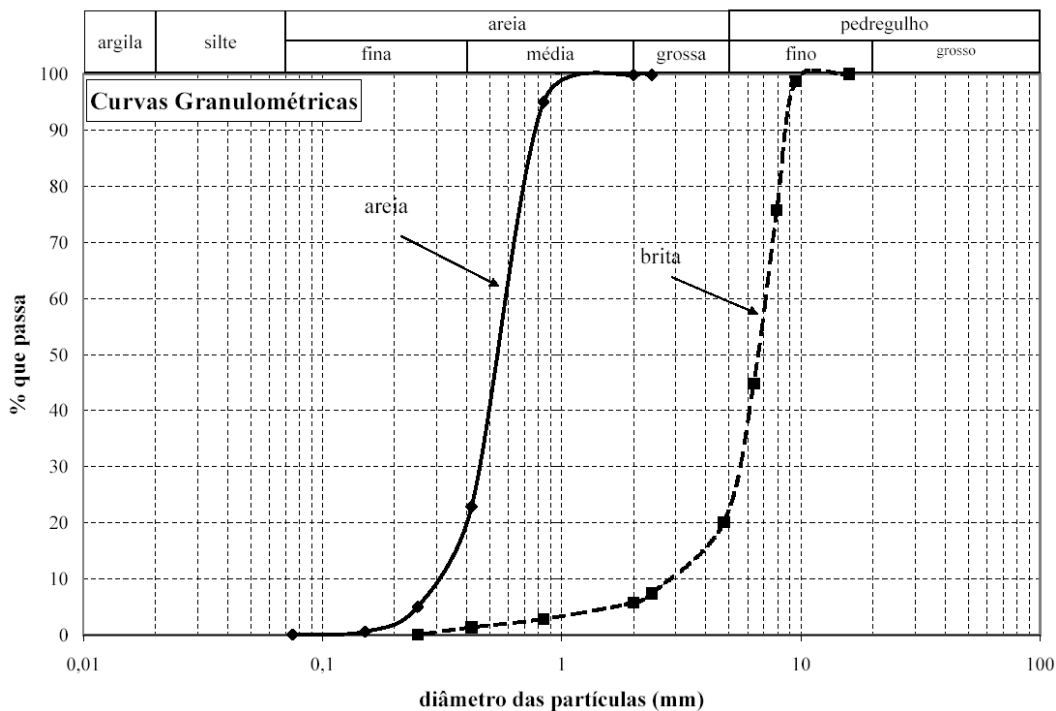


Figura 316 - Curvas granulométricas da areia e da brita.

A areia é proveniente da praia de Ipanema. É uma areia uniforme de quartzo, com partículas de dimensões que variam entre 0,074 e 2,38mm. Os valores de peso específico mínimo e máximo são de 15,47 e 17,04kN/m³, respectivamente.

O segundo material é um pedregulho uniforme, proveniente de britagem de rocha granito-gnáissica que tem partículas com dimensões variando de 0,42 a 9,25mm. Os valores de peso específico mínimo e máximo são de 13,80 e 16,42kN/m³, respectivamente.

A densidade relativa utilizada no programa experimental, para os dois materiais, foi de 15% o que equivale a pesos específicos de 15,69kN/m³, areia, e 14,14kN/m³, brita.

Nas Tabelas 78 e 79 encontram-se algumas das características dos dois materiais, como os diâmetros máximo ($D_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($D_{m\acute{i}n}$), os diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c) e os pesos específicos máximo ($\gamma_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($\gamma_{m\acute{i}n}$).

Tabela 78 - Características granulométricas da areia e da brita

Solo	$D_{m\acute{i}n}$ (mm)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	C_u	C_c
areia	0,08	0,31	0,45	0,60	2,38	1,94	1,09
brita	0,42	2,85	5,60	7,00	9,53	2,46	1,57

Tabela 79 - Características físicas da areia e da brita

Solo	γ_s (kN/m ³)	$\gamma_{m\acute{a}x}$ (kN/m ³)	$\gamma_{Dr-15\%}$ (kN/m ³)	$\gamma_{m\acute{i}n}$ (kN/m ³)	$e_{m\acute{i}n}$	$e_{Dr-15\%}$	$e_{m\acute{a}x}$
areia	26,09	17,04	15,69	15,47	0,53	0,66	0,69
brita	26,46	16,42	14,14	13,80	0,61	0,87	0,92

Geossintéticos

Pala avaliar o desempenho do equipamento foram utilizados 3 geossintéticos: uma geomembrana de PVC, uma geomembrana de PEAD, e uma geogrelha.

A geomembrana de PVC foi a CipaGeo, texturizada em uma das faces, fabricada pela Cipatex (Figura 317a). A Tabela 80 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

A segunda geomembrana, de PEAD, utilizada foi a Polimanta fabricada pela Engepol (Figura 317b). Ela tem 1mm de espessura e possui as duas faces lisas. A Tabela 81 apresenta as principais características do material segundo o fabricante.

Tabela 80 - Característica da Geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Densidade	1200kg/m ³	ASTM D 792A
Gramatura	960g/m ²	NBR 12592
Espessura	0,8mm	ASTM D 1593
Resistência ao Rasgo	35N	ASTM D 1004
Resistência a Tração	10N/mm	ASTM D 882
Alongamento na Ruptura	200%	ASTM D 882
Módulo de Elasticidade	8MPa	ASTM D 882

Tabela 81 - Característica da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Espessura Nominal	1mm	ASTM D 5199
Densidade	≥ 0,94g/m ³	ASTM D 792
Resistência a Tração	no Escoamento	≥ 15kN/m
	na Ruptura	≥ 27kN/m
	Alongamento no Escoamento	≥ 12%
	Alongamento na Ruptura	≥ 700%
Resistência ao Rasgo	≥ 125N	ASTM D 1004
Resistência ao Puncionamento	≥ 320N	ASTM D 4833
Teor de Negro de Fumo	2 - 3	ASTM D 1603
Dispersão de Negro de Fumo	Nota	ASTM D 5596

Nota: Dispersão de Negro de Fumo para 10 diferentes amostras: 9 nas categorias 1 e 2 e 1 na categoria 3.

A geogrelha empregada foi a Fortrac 35/25-20/30 fabricada pela Huesker (Figura 317c). Ela é constituída de poliálcool de vinila (PVA) e suas características, segundo o fabricante, são apresentadas na Tabela 82.

Tabela 82 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2003)

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Massa por Unidade de Área	270g/m ²	ASTM D-5261
Abertura	20 x 30mm	~
Porcentagem de Área Aberta	70 %	~
Resistência à Tração	Longitudinal	35kN/m
	Transversal	25kN/m
Alongamento na Ruptura (longitudinal)	4-6%	ASTM D-6637



(a) Geomembrana Cipageo



(b) Geomembrana Polimanta



(c) Geogrelha Fortrac 35/25-20/30

Figura 317 - Geossintéticos ensaiados.

Apêndice IX. Análise de Distribuição de Tensões

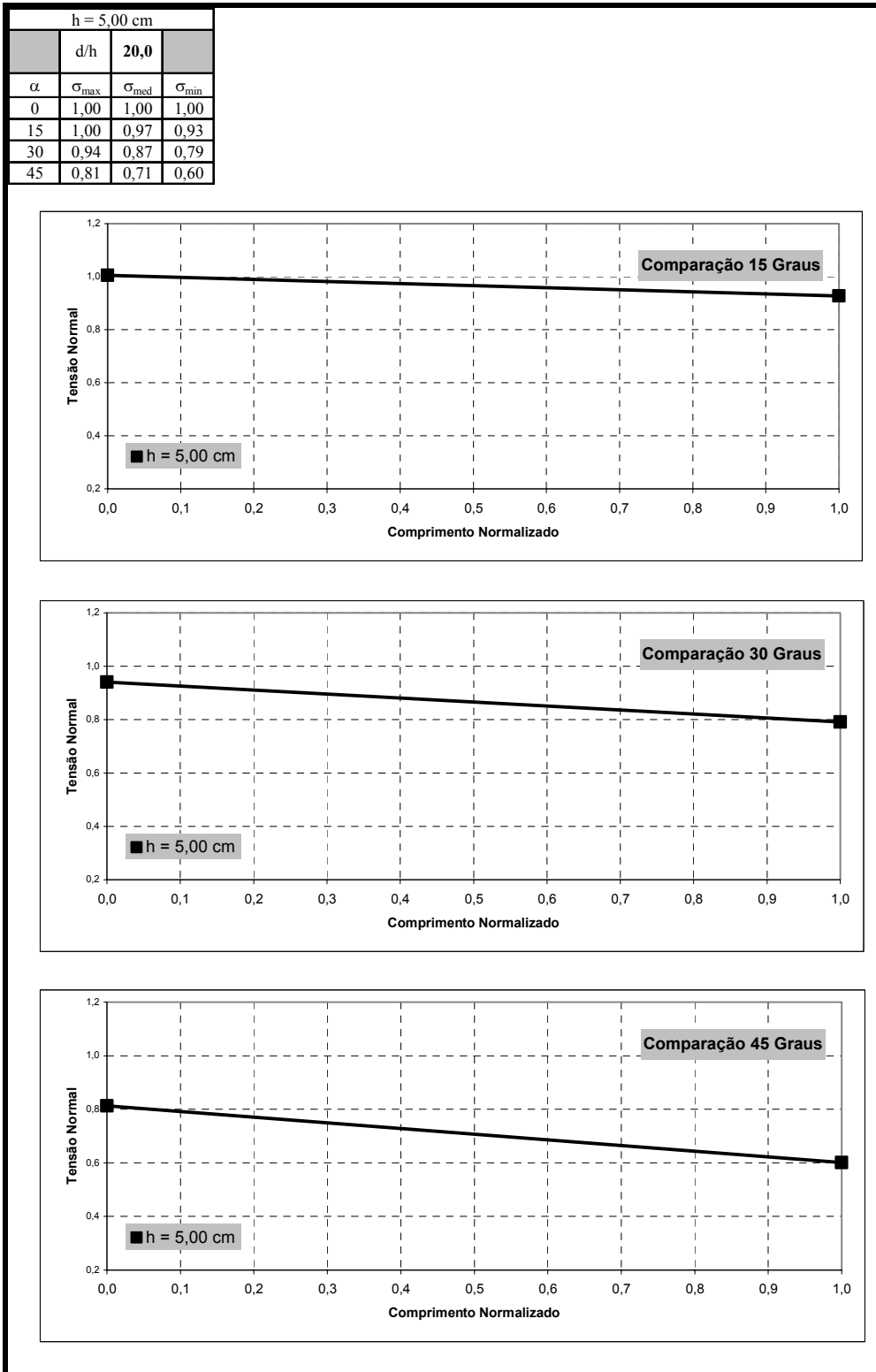


Figura 318 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 1.

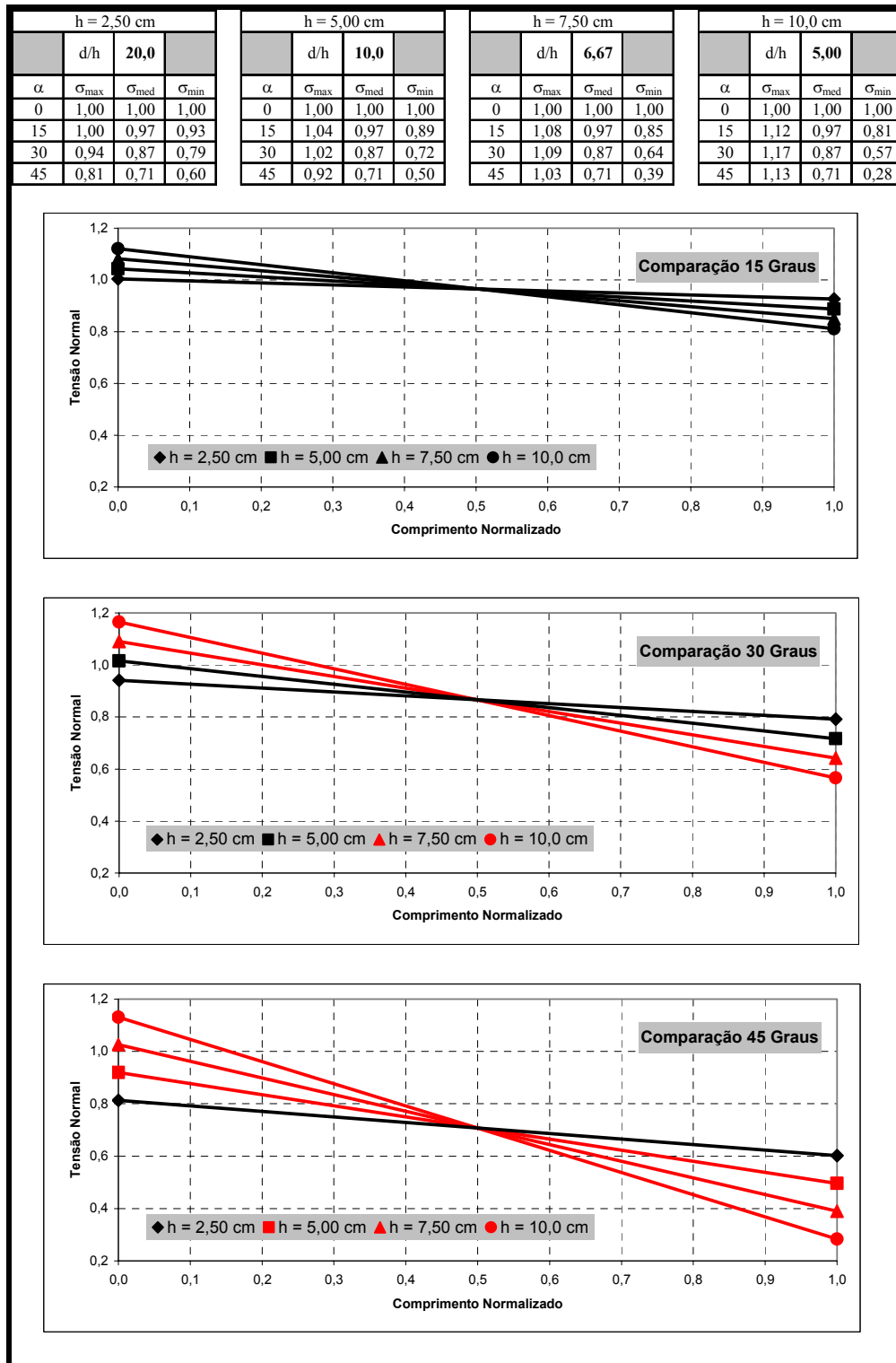


Figura 319 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 2.

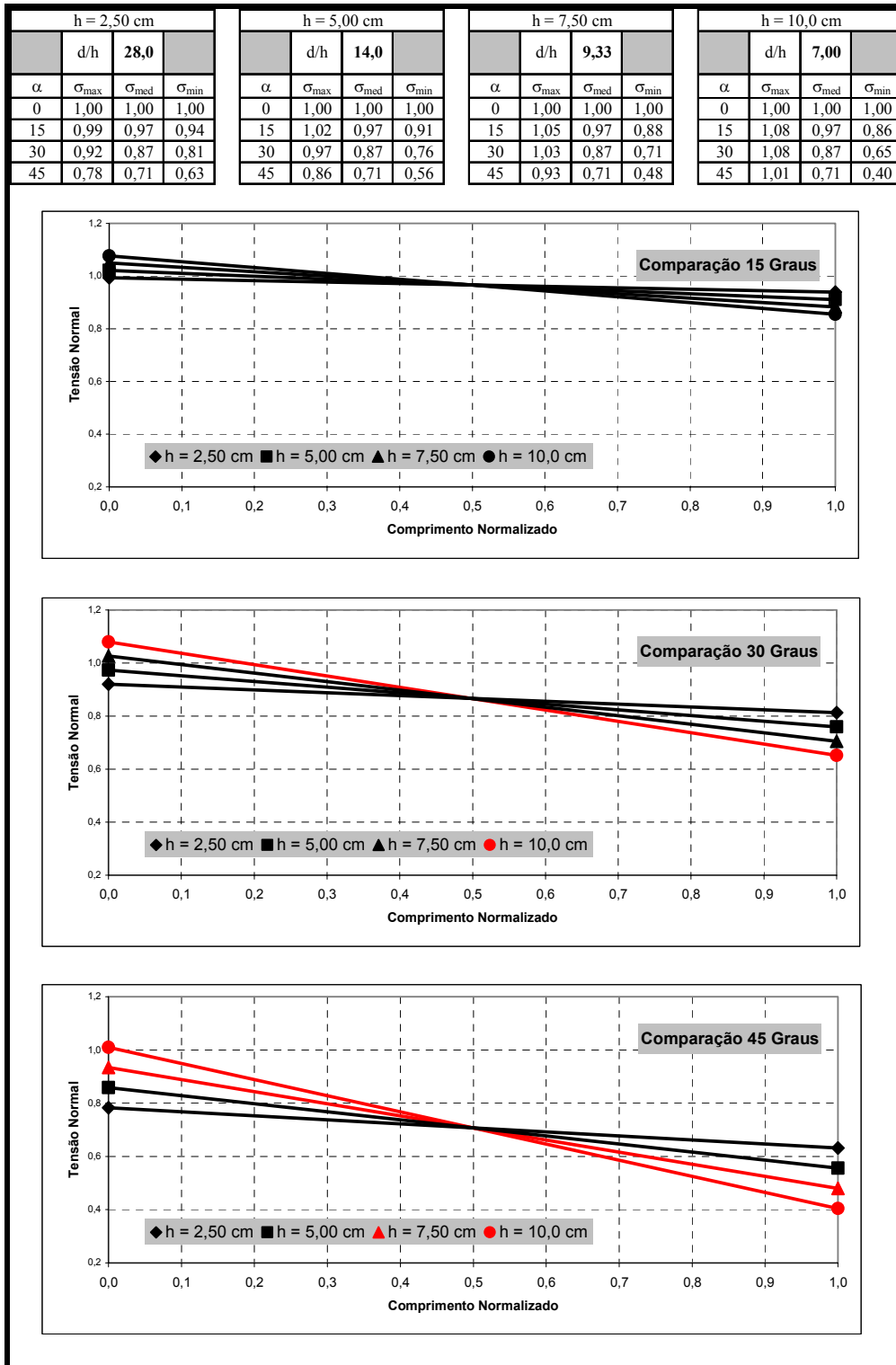


Figura 320 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 3.

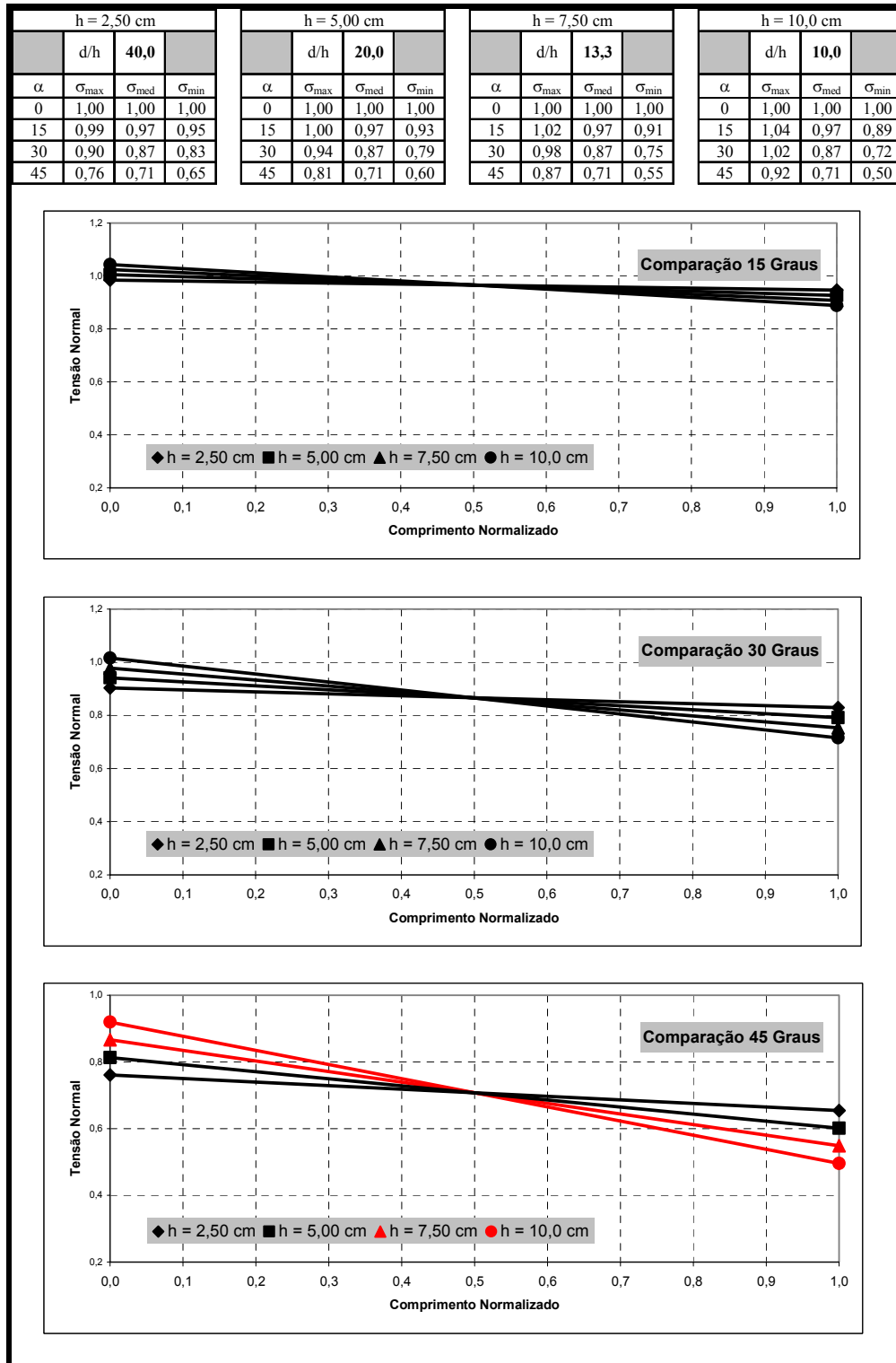


Figura 321 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 4.

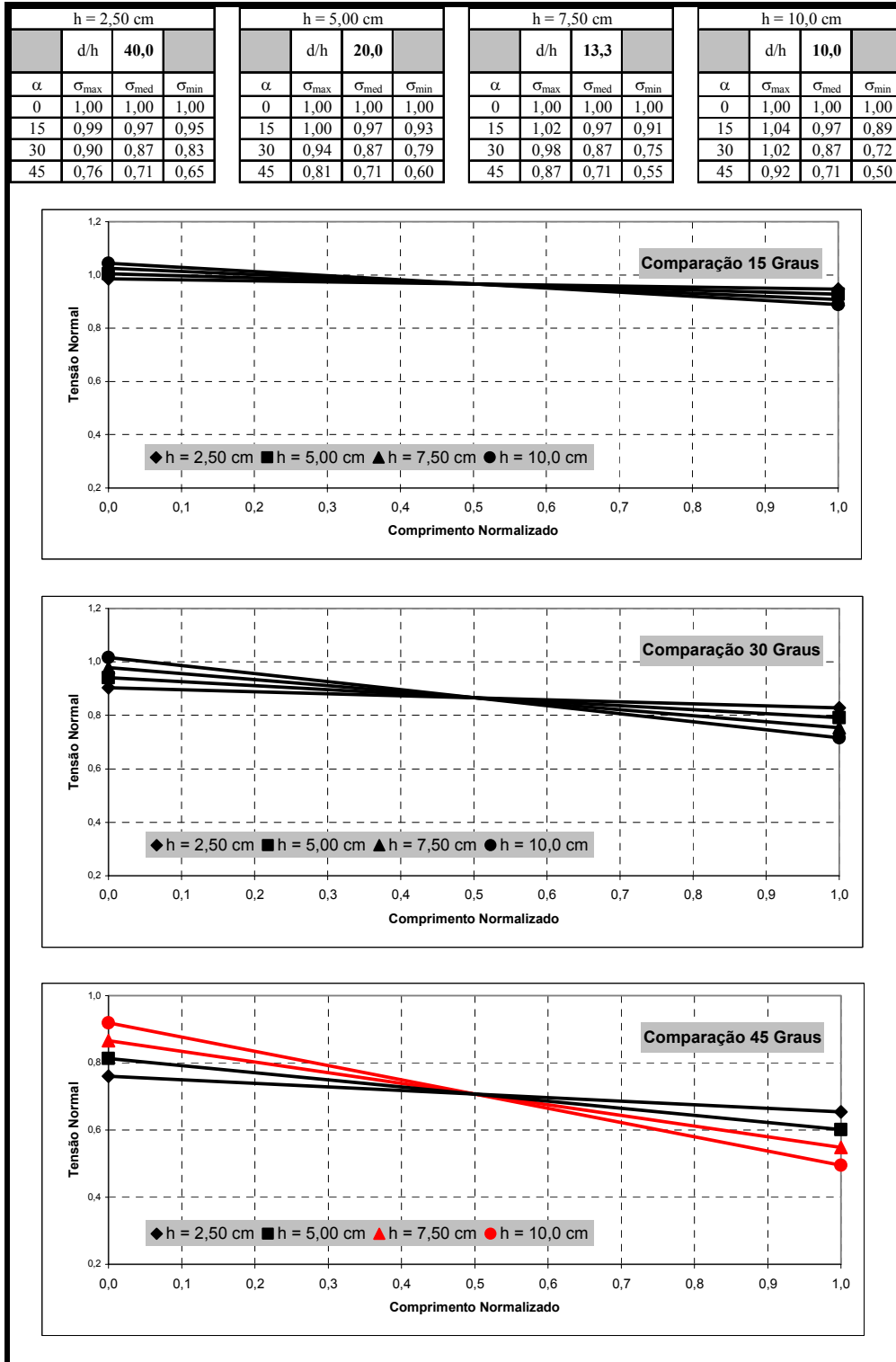


Figura 322 - Análise de distribuição de tensões para o conjunto de caixas de ensaio 5.

Anexo I.

Critérios de Ruptura

Sobre os critérios de ruptura normalmente utilizados empregados para solos Bomfim (2001), escreveu (Figura 307):

(i) Critério da tensão desviadora de pico (1): O critério de máxima tensão desviadora, ou pico da curva tensão-deformação é um dos mais tradicionais associados com a ruptura de corpos de prova. No entanto, nem sempre a curva tensão-deformação apresenta pico, e outro critério de ruptura deve ser estabelecido.

(ii) Critério da máxima razão das tensões principais (2): O critério de máxima razão entre as tensões principais é particularmente útil para argilas nas quais a tensão desviadora continua a aumentar com o aumento das deformações. Possibilita a avaliação da não linearidade da envoltória de ruptura.

(iii) Critério da deformação limite (3): Para solos nos quais grandes deformações são necessárias para mobilizar a resistência cisalhante, uma condição de deformação limite pode ser mais apropriada do que as anteriores.

(iv) Critério do estado crítico (4): Para argilas, o estado crítico é a condição na qual o corpo de prova continua a deformar em volume constante, sob constante tensão efetiva. O conceito de estado crítico representa um comportamento idealizado para argilas remoldadas. Argilas sobreadensadas, principalmente, não atendem a este conceito.

(v) Critério do estado residual (5): Se forem impostos grandes deslocamentos ao corpo de prova, sob tensão normal contínua, então a resistência ao cisalhamento vai continuamente decrescer até atingir um valor constante. Este valor representa a condição residual.

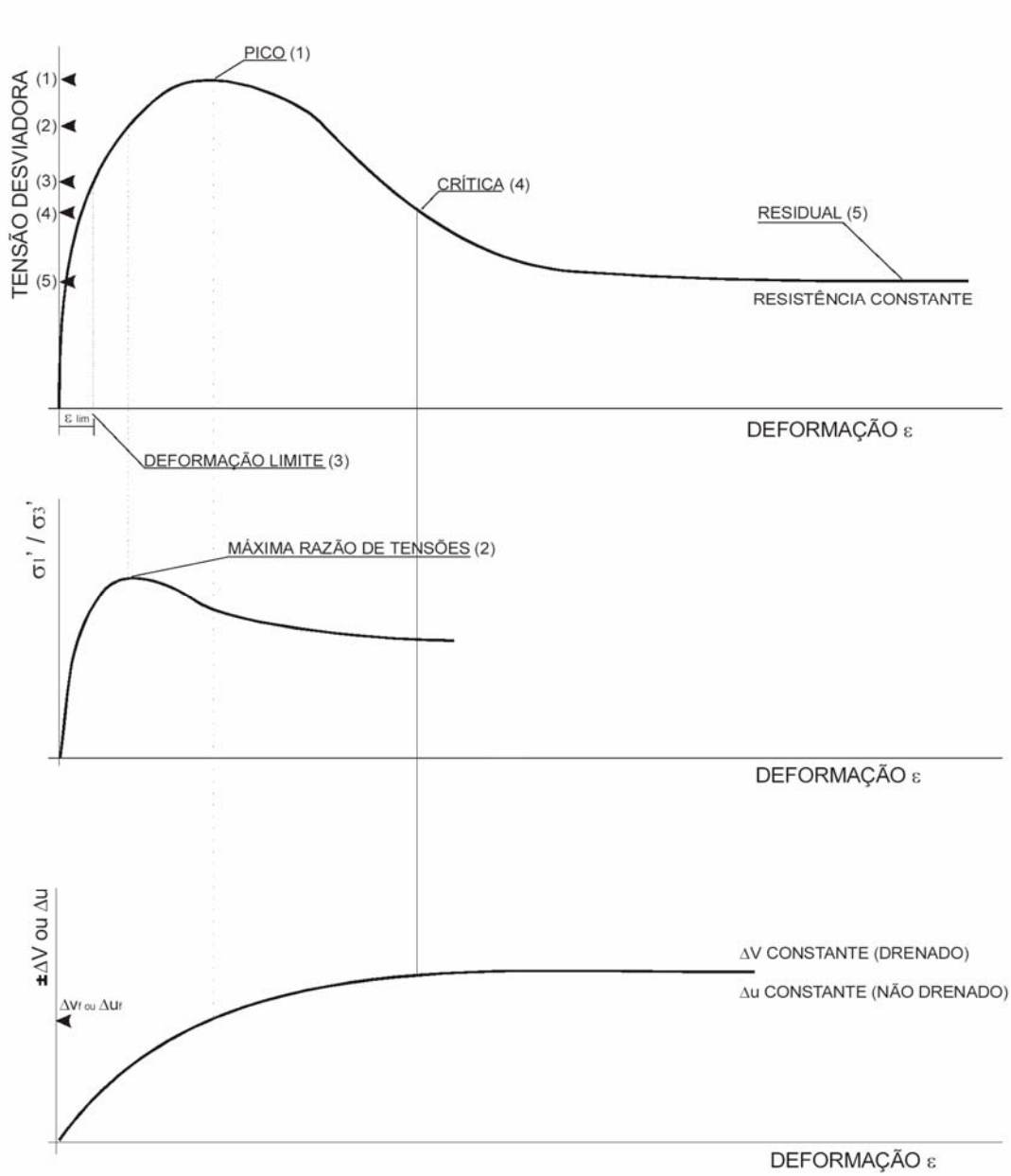


Figura 323 - Critérios de ruptura para solos (Bomfim, 2001).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)