

# ENSAIOS DE RAMPA PARA ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACES SOLO-GEOSSINTÉTICO

VINÍCIUS ROBERTO DE AGUIAR

Dissertação apresentada ao corpo docente de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia**.

Porto Alegre  
Julho de 2003

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pela orientadora e pelo Programa de Pós-Graduação.

---

Prof<sup>a</sup>. Anna Laura L.S. Nunes  
Orientadora, UFRGS-PPGEC

---

Prof. Alberto S. F. J. Sayão  
Orientador, PUC-Rio

---

Prof. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC

### **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Ennio Marques Palmeira  
PhD – Universidade de Oxford, Inglaterra

Prof. Nilo César Consoli  
PhD – Universidade Concórdia, Canadá

Prof. Luis Antônio Bressani  
PhD – Imperial College, Inglaterra

*Aos meus  
pais, Faustino e Tereza  
e  
minha irmã  
Viviane  
pelo carinho e apoio*

## **Agradecimentos**

À Prof<sup>a</sup>. Anna Laura, pela orientação, pela dedicação, pelos incentivos demonstrados e principalmente pela amizade.

Ao Prof. Sayão pela confiança demonstrada, orientação e amizade.

Aos técnicos da UFRGS João e Flávio pela ajuda e conselhos no projeto e montagem do equipamento e execução dos ensaios.

Ao colega Fernando Maria Mantaras pela contribuição.

À Alcoa (Poços de Caldas) e LPS Engenharia (Rio de Janeiro) pelo apoio na execução da campanha de ensaios de campo.

A Puc-Rio pelo apoio a pesquisa e ao colega Leonardo Becker

À Huesker, em particular ao eng. Flávio Montez, pelo apoio financeiro ao trabalho de pesquisa.

E à CAPES, pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de mestrado.

## Sumário

|   |            |
|---|------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>                                       | <b>vii</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS</b>                                       | <b>xi</b>  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b>                       | <b>xii</b> |
| <b>RESUMO</b>   | <b>xiv</b> |
| <b>ABSTRACT</b>   | <b>xv</b>  |
| <br>  |            |
| <b>CAPÍTULO I</b>   |            |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>  |            |
| 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS                                  | 01         |
| 1.2 – MOTIVAÇÃO E OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO                     | 02         |
| 1.3 – ESCOPO DA DISSERTAÇÃO                                   | 02         |
| <br>  |            |
| <b>CAPÍTULO II</b>  |            |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                               |            |
| 2.1 – INTRODUÇÃO  | 04         |
| 2.2 – GEOSSINTÉTICOS  | 04         |
| 2.2.1 – Tipos de Geossintéticos                               | 05         |
| 2.2.2 – Principais Aplicações dos Geossintéticos              | 07         |
| 2.2.3 – Materiais Constituintes dos Geossintéticos            | 09         |
| 2.2.4 – Propriedades Físicas e Hidráulicas dos Geossintéticos | 09         |
| 2.2.5 – Propriedades Mecânicas dos Geossintéticos             | 11         |
| 2.3 – INTERAÇÃO SOLO -GEOSSINTÉTICO                           | 13         |
| 2.4 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO  | 15         |
| 2.4.1 – Cisalhamento Direto                                   | 15         |
| 2.4.2 – Ensaios de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado  | 19         |
| 2.4.3 – Arrancamento  | 20         |
| 2.4.4 – Ensaios de Rampa                                      | 24         |
| 2.5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS                                    | 35         |

## **CAPÍTULO III**

### **3 – EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE RAMPA**

|  |           |
|--|-----------|
| 3.1 – INTRODUÇÃO                       | 38        |
| 3.2 – REFERÊNCIA NORMATIVA             | 39        |
| 3.3 – EQUIPAMENTO                      | 40        |
| <b>3.3.1 – Sistema de Basculamento</b> | <b>43</b> |
| <b>3.3.2 – Caixas de Ensaio</b>        | <b>45</b> |
| <b>3.3.3 – Instrumentação</b>          | <b>46</b> |
| <b>3.3.4 – Sistema de Confinamento</b> | <b>49</b> |
| 3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS             | 54        |

## **CAPÍTULO IV**

### **4 – RESULTADOS E ANÁLISES**

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1 – INTRODUÇÃO                                    | 55        |
| 4.2 – MATERIAIS UTILIZADOS                          | 55        |
| <b>4.2.1 – Solo</b>                                 | <b>55</b> |
| <b>4.2.2 – Geossintéticos</b>                       | <b>56</b> |
| 4.3 – METODOLOGIA DO ENSAIO DE RAMPA                | 59        |
| <b>4.3.1 – Preparação dos Corpos de Prova</b>       | <b>59</b> |
| <b>4.3.2 – Procedimento do Ensaio de Rampa</b>      | <b>61</b> |
| <b>4.3.3 – Metodologia de Análise de Resultados</b> | <b>62</b> |
| 4.4 – ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO E CONFIABILIDADE        | 65        |
| <b>4.4.1 – Ensaio de Repetibilidade</b>             | <b>65</b> |
| <b>4.4.2 – Ensaio de Reuso</b>                      | <b>66</b> |
| 4.5 – ENSAIOS DE INTERFACE                          | 69        |
| <b>4.5.1 – Interfaces Solo-Solo</b>                 | <b>70</b> |
| <b>4.5.2 – Interfaces Solo-Geotêxtil</b>            | <b>75</b> |
| <b>4.5.3 – Interfaces Solo-Geogrelha</b>            | <b>80</b> |
| <b>4.5.4 – Interfaces Solo-Geomembrana</b>          | <b>84</b> |
| <b>4.5.5 – Eficiência</b>                           | <b>88</b> |
| 4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS                          | 90        |

|  |     |
|--|-----|
| <b>CAPÍTULO V</b>                      |     |
| <b>5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>      | 92  |
| 5.1 – CONCLUSÕES                       | 92  |
| 5.2 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 94  |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>      | 95  |
| <b>ANEXO</b>                           |     |
| A-I                                    | 101 |

## Lista de Figuras

### CAPÍTULO II

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Modos de interação entre o solo e o geossintético _____   | 13 |
| Figura 2.2 – Ensaio de cisalhamento direto: (a) Geossintético entre duas camadas de solo e (b) Geossintético colado em base rígida. _____                      | 15 |
| Figura 2.3 – Obtenção dos parâmetros de resistência da interface (Sieira, 2003) _  | 16 |
| Figura 2.4 – Efeito da montagem do ensaio de cisalhamento direto (Adaptado Saez, 1997) _____   | 17 |
| Figura 2.5 – Efeito das dimensões do equipamento de ensaios de cisalhamento direto para geogrelha (Adaptado de Saez, 1997) _____                               | 18 |
| Figura 2.6 – Ensaio de cisalhamento com reforço inclinado _____  | 19 |
| Figura 2.7 – Influência da luva nos ensaios de arrancamento (Lopes e Ladeira, 1996) _____  | 23 |
| Figura 2.8 – Esquema de talude de disposição de resíduos com multicamadas de geossintéticos (Adap. de Mello <i>et al.</i> , 2003) _____                        | 25 |
| Figura 2.9 – Representação esquemática do equipamento de ensaio de rampa (Adaptado da ISO 12957-2) _____   | 25 |
| Figura 2.10 – Mecânica do Ensaio de Rampa (Mello <i>et al.</i> , 2003) _____   | 26 |
| Figura 2.11 – Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado: (a) Inclinação de 15° e (b) Inclinação de 25° (Mello <i>et al.</i> , 2003) _____ | 28 |
| Figura 2.12 – Equipamento de rampa do CEMAGREF (Girard <i>et al.</i> , 1990) _____   | 29 |
| Figura 2.13 – Equipamento de rampa da Universidade de Ankara (Izgin e Wasti, 1998) _____   | 30 |
| Figura 2.14 – Equipamento de rampa da Universidade de Brasília (Mello <i>et al.</i> , 2003) _____  | 30 |
| Figura 2.15 – Equipamento de rampa da Universidade do Porto (Lopes, 2001) _____  | 31 |
| Figura 2.16 – Equipamento de rampa da Universidade de Bordeaux (Brianchon <i>et al.</i> , 2002) _____  | 32 |
| Figura 2.17 – Equipamento de rampa do GSE <i>Lining Technology</i> (Narejo, 2003) _  | 33 |

### **CAPÍTULO III**

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1 – Ensaios típicos das interfaces solo-geossintético: (a) Cisalhamento Direto, (b) Arrancamento e (c) Rampa                           | 39 |
| Figura 3.2 – Vista frontal do equipamento   | 41 |
| Figura 3.3 – Vista lateral do equipamento   | 42 |
| Figura 3.4 – Vista superior do equipamento  | 43 |
| Figura 3.5 – Equipamento de ensaio de rampa: (a) Vista geral com rampa inclinada, (b) Detalhe da ligação das partes do pórtico.                 | 44 |
| Figura 3.6 – Detalhe da dobradiça de ligação da rampa à estrutura   | 44 |
| Figura 3.7 – Sistema de basculamento: (a) Fixação da talha no topo do pórtico, (b) Ancoragem da corrente na base da rampa                       | 45 |
| Figura 3.8 – Ensaios de interface solo-geotêxtil: (a) Posição inicial e (b) Posição final   | 46 |
| Figura 3.9 – Detalhe da roldana da caixa superior sobre o trilho da caixa inferior  | 47 |
| Figura 3.10 – Medidor de ângulo de rampa: (a) Vista geral e (b) Detalhe   | 47 |
| Figura 3.11 – Medidor de ângulo de base magnética   | 48 |
| Figura 3.12 – Medidor de deslocamento da caixa superior do tipo <i>tell tale</i> : (a) Vista superior, (b) Detalhe da fixação na caixa superior | 49 |
| Figura 3.13 – Distribuição das tensões de confinamento com a inclinação da rampa  | 50 |
| Figura 3.14 – Esquema de distribuição da tensão de confinamento: (a) Vista lateral: (b) Vista frontal   | 51 |
| Figura 3.15 – Condição de tombamento do sistema de confinamento com a inclinação da rampa   | 52 |
| Figura 3.16 – Análise do tombamento para a tensão de confinamento de 4,6kPa   | 53 |

### **CAPÍTULO IV**

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo silto-argiloso  | 56 |
| Figura 4.2 – Envoltória de resistência obtida dos ensaios de cisalhamento direto (Becker, 2003) | 57 |
| Figura 4.3 – Geossintéticos ensaiados: (a) Geotêxtil, (b) Geogrelha e (c) Geomembrana           | 59 |
| Figura 4.4 – Instalação da amostra de geogrelha na preparação do ensaio de rampa                | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.5 – Preparação da amostra de solo na caixa superior: (a) Lançamento, (b) Compactação e (c) Controle de altura                              | 61 |
| Figura 4.6 – Conclusão do ensaio de rampa de interface solo-geotêxtil   | 61 |
| Figura 4.7 – Resultado típico de ensaio de rampa na interface solo-geotêxtil.   | 62 |
| Figura 4.8 – Esquema de forças do ensaio de rampa   | 63 |
| Figura 4.9 – Repetibilidade dos resultados de ensaios de rampa  | 65 |
| Figura 4.10 – Curva ângulo de inclinação vs deslocamento para a mesma interface solo-geotêxtil – 9 repetições                                       | 67 |
| Figura 4.11 – Variação do ângulo de inclinação com o número de ensaios – Interface solo-geotêxtil   | 68 |
| Figura 4.12 – Curvas ângulo de inclinação vs deslocamento para a mesma interface solo-solo – 6 repetições   | 68 |
| Figura 4.13 – Variação do ângulo de inclinação com o número de ensaios – Interface solo-solo  | 69 |
| Figura 4.14 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-solo  | 71 |
| Figura 4.15 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento, (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-solo        | 73 |
| Figura 4.16 – Envoltória de resistência da interface solo-solo  | 74 |
| Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geotêxtil   | 75 |
| Figura 4.18 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento, (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-geotêxtil   | 77 |
| Figura 4.19 – Enrugamento da amostra de geotêxtil após o ensaio de rampa ( $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ )   | 78 |
| Figura 4.20 – Estricção da amostra de geotêxtil após o ensaio de rampa ( $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ )   | 79 |
| Figura 4.21 – Envoltória de resistência da interface solo-geotêxtil   | 79 |
| Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geogrelha   | 81 |
| Figura 4.23 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento, (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-geogrelha   | 82 |
| Figura 4.24 – Envoltória de resistência da interface solo-geogrelha   | 83 |
| Figura 4.25 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geomembrana   | 85 |
| Figura 4.26 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento, (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-geomembrana | 86 |

Figura 4.27 – Deformações da geomembrana: (a) Estricção e (b) Enrugamento ( $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ ) \_\_\_\_\_ 87

Figura 4.28 – Envoltória de resistência da interface solo-geogrelha \_\_\_\_\_ 88

Figura 4.29 – Envoltórias de resistência das interfaces solo-solo e solo-geomembrana \_\_\_\_\_ 89

## Lista de Tabelas

### CAPÍTULO II

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Principais tipos de geossintéticos _____  | 05 |
| Tabela 2.2 – Principais aplicações dos geossintéticos _____  | 08 |
| Tabela 2.3 – Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (Sieira, 2003) _____                                 | 08 |
| Tabela 2.4 – Propriedades dos polímeros (Lopes, 2001) _____  | 09 |
| Tabela 2.5 – Características de alguns equipamentos de arrancamento (Teixeira, 1999) _____                             | 21 |
| Tabela 2.6 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto e rampa (Adap. de Izgin e Wasti, 1998) _____ | 34 |

### CAPÍTULO III

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Limites críticos para tombamento do sistema de confinamento _____ | 53 |
|--|----|

### CAPÍTULO IV

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1. – Características físicas do solo silto-argiloso _____  | 55 |
| Tabela 4.2 – Características do geotêxtil Geofort G300 (Ober, 1999) _____   | 58 |
| Tabela 4.3. – Características da geogrelha Fortrac 55/25-20/30 (Huesker, 2002) _____                                  | 58 |
| Tabela 4.4 – Características da geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003) _____   | 58 |
| Tabela 4.5 – Comparação das tensões cisalhantes com e sem contribuição do peso da caixa ( $\alpha = 40^\circ$ ) _____ | 64 |
| Tabela 4.6 – Ensaio de repetibilidade na interface solo-geotêxtil _____   | 66 |
| Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-solo _____   | 72 |
| Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geotêxtil _____  | 76 |
| Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geogrelha _____  | 80 |
| Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geomembrana _____                                     | 87 |

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

- a – adesão solo-geossintético
- A – área de contato entre o solo e o geossintético
- c – coesão do solo
- $C_u$  – coeficiente de uniformidade
- F – componente do peso da caixa de ensaio que contribui na tensão de cisalhamento
- h – altura da amostra de solo
- IP – índice de plasticidade
- l – deslocamento da caixa superior em relação à inferior
- L – comprimento da base da amostra de solo
- LL – limite de liquidez
- LP – limite de plasticidade
- M - momento
- $M_A$  – gramatura
- $n_{GT}$  - porosidade
- P – força vertical aplicada na área de contato solo-geossintético
- Q – peso da caixa de ensaio
- PA - poliamida
- PE - polietileno
- PEAD – polietileno de alta densidade
- PET - poliéster
- PP – polipropileno
- t – espessura do geossintético
- $t_{GT}$  – espessura nominal
- x – distância entre a extremidade inferior do bloco de solo e o ponto de aplicação da força normal na interface
- $X_{CG}$  – centro de gravidade
- $X_2$  – distância do terço médio da rampa até a extremidade
- W – peso da amostra
- $\alpha$  – ângulo de inclinação da rampa
- $\alpha_{crit}$  – ângulo crítico de inclinação da rampa

$\phi$  – ângulo de atrito interno do solo  
 $\phi_{sg}$  – ângulo de atrito da interface  
 $\gamma_a$  – peso específico da água  
 $\gamma_d$  – peso específico máxima  
 $\gamma_s$  – peso específico real dos grãos  
 $k_p$  – permeabilidade no plano  
 $k_n$  – permeabilidade normal  
 $\omega_{ot}$  – umidade ótima  
 $\theta$  - transmissividade  
 $\rho_t$  – densidade do filamento  
 $\sigma_c$  – tensão de confinamento  
 $\sigma$  – tensão normal na interface  
 $\sigma_{m\acute{a}x}$  – tensão de confinamento máxima  
 $\sigma_{m\acute{i}n}$  – tensão de confinamento mínima  
 $\tau$  – tensão cisalhante, tensão cisalhante na interface  
 $\psi$  - permissividade

## Resumo

O emprego de materiais geossintéticos em obras de Engenharia Civil tem sido freqüente nas últimas décadas. Os projetos e obras exigem uma maior compreensão do comportamento de interação solo-geossintético. Este mecanismo de interação é complexo e depende das propriedades dos materiais envolvidos. Os parâmetros de resistência da interface são determinados em ensaios de campo, menos usuais, e ensaios de laboratório, dos quais destacam-se os ensaios de arrancamento e cisalhamento direto, e, mais recentemente, ensaios de rampa. A escolha do ensaio mais adequado é função do tipo de geossintético e da sua solicitação na massa de solo.

Este trabalho teve como finalidade geral desenvolver um equipamento de grande escala, capaz de executar em uma mesma estrutura os principais ensaios de resistência de interfaces solo-geossintético. Especificamente, o objetivo principal consistiu em habilitar o equipamento para a realização de ensaios de rampa.

O equipamento de rampa teve seu desempenho avaliado através de ensaios preliminares que permitiram avaliar a acurácia dos resultados e a adequação da metodologia de preparação dos corpos de prova e procedimento de ensaio.

O programa experimental envolveu ensaios de rampa em quatro tipos distintos de interface: solo-solo, solo-geotêxtil, solo-geogrelha e solo-geomembrana. Os ensaios de interface solo-solo permitiram a avaliação do equipamento, a comparação com ensaios convencionais de cisalhamento direto e a obtenção dos parâmetros de resistência para a determinação das eficiências de interação das interfaces em termos de adesão e ângulo de atrito. Os ensaios de interface solo-geossintéticos indicaram um comportamento de resistência semelhante ao reportado na literatura e condicionado pelo tipo de material.

## **Abstract**

The use of geosynthetic materials in Civil Engineering has been growing in the last decades. The design and field works demand a better understanding of the interaction behavior between soil and geosynthetic. The interaction mechanisms are complex and depend on the properties of both materials. Interface strength parameters are determined with laboratory and in situ tests. The most common laboratory devices are the pullout test and direct shear. More recently, inclined plane devices have also been developed. The choice of the most appropriate test equipment is a function of the geosynthetic type and its solicitation in the soil mass.

The general purpose of this research was to develop an equipment of large dimensions, which would be capable to performing different types of resistance tests with soil-geosynthetic interfaces. More specifically, the research focused at the equipment for inclined plane tests.

Preliminary tests were done for evaluating the methodology of specimen preparation and test procedures and also the reliability and accuracy of the inclined plane results with different materials.

The experimental program included inclined plane tests in four different types of interface: soil-geotextile, soil-geogrid, soil-geomembrane and soil-soil. Tests on soil-soil interfaces allowed the evaluation of the equipment performance and a comparison between results from inclined shear and conventional direct shear. Strength parameters were also obtained for determining the efficiency interaction factors of the interfaces. The results of soil-geosynthetic interfaces herein presented indicate that the equipment developed in this research is able to produce reliable results, when compared to similar tests reported in the literature.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, o uso de materiais geossintéticos em obras de Engenharia Civil tem sido freqüente. 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 ainda uma demanda de melhoria das técnicas de dimensionamento, calcada sobretudo, na necessidade de uma maior compreensão do comportamento destes materiais quando inseridos na massa de solo, ou seja, as características da interação solo-geossintético.

Este mecanismo de interação complexo é função, basicamente, das propriedades dos materiais utilizados, solo e geossintético, representadas pelo coeficiente de adesão ( $a$ ) e ângulo de atrito de interface ( $\phi_{sg}$ ). Usualmente são utilizados ensaios de campo e laboratório para a obtenção destes parâmetros.

Os ensaios de campo têm a vantagem de representar mais adequadamente os mecanismos de interação, porém são de difícil execução e onerosos. Já os ensaios de laboratório têm custos mais acessíveis, porém mostram inconvenientes, tais como o tamanho da amostra.

Os ensaios de laboratório mais utilizados são o ensaio de cisalhamento direto convencional, cisalhamento com reforço inclinado, cisalhamento em plano inclinado ou rampa e o de arrancamento.

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 com parte do solo envolvente e a resistência for mobilizada pelo deslizamento da massa restante, o ensaio mais adequado é o de cisalhamento direto. Se o 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.

Porém, para uma série de situações de obra como cobertura de taludes e impermeabilização de barragens de rejeitos, os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento não representam corretamente o mecanismo de interação solo-geossintético. Nestes casos, a resistência é mobilizada pelo deslocamento da massa superior de solo em relação ao geossintético, que permanece solidário à massa de solo, em plano inclinado. Para estas situações, os ensaios mais representativos são os de rampa.

## 1.2 – MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Tendo em vista que o estudo do comportamento de interface solo-geossintético é fundamental para o aprimoramento de técnicas construtivas e que a execução de ensaios de laboratório é a forma mais comum de realizar este estudo, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um equipamento de grande escala, capaz de executar em uma mesma estrutura os principais ensaios de caracterização de interface solo-geossintético. O projeto da estrutura deveria considerar a execução de ensaios de arrancamento, cisalhamento direto e de rampa.

A meta principal consistiu em habilitar o equipamento para a realização de ensaios de rampa. Para isto executou-se uma série de ensaios de calibração, repetibilidade e reuso do novo equipamento. Como objetivo final, foi realizado um estudo sobre resistência de interfaces através de ensaios de rampa, empregando-se três tipos de geossintéticos e um solo silto-argiloso.

## 1.3 – ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos. Neste Capítulo apresenta-se uma breve introdução, justificando o estudo da resistência solo-geossintético através de ensaios de rampa em laboratório. Apresenta também o objetivo principal desta pesquisa que consiste no desenvolvimento do equipamento de rampa de grandes dimensões com possibilidade para também executar ensaios de cisalhamento direto e arrancamento.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, que consiste de uma breve descrição dos tipos de geossintéticos, suas aplicações, suas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, os mecanismos de interação solo-geossintético e os ensaios mais utilizados para seu estudo.

O Capítulo 3 apresenta as premissas de projeto do equipamento desenvolvido. Nele consta a referência normativa utilizada e os detalhes do equipamento, tais como, sistemas de içamento, de confinamento e instrumentação, além das condições de sua utilização.

No Capítulo 4 apresenta-se a caracterização dos materiais utilizados, as metodologias de preparação dos corpos de prova, o procedimento de ensaio, o método de análise de resultados, os ensaios de calibração do equipamento, os ensaios de interface e as análises dos resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 5, encontram-se reunidas as conclusões do trabalho, juntamente com algumas sugestões para pesquisas futuras. O Anexo I apresenta uma análise da condição de uso do equipamento de rampa.

## CAPÍTULO II

### 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 – INTRODUÇÃO

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*. 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.

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 do Jordão.

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

Este capítulo aborda as principais características dos geossintéticos usualmente disponíveis no mercado, trata das propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas, sobretudo, a resistência da interface solo-geossintético e os ensaios de laboratório utilizados para a sua determinação.

#### 2.2 – GEOSSINTÉTICOS

A Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS) define os geossintéticos como: “elementos planos, produzidos a partir de polímeros sintéticos ou naturais, e utilizados em combinação com solo, rocha e/ou outros materiais geotécnicos como

parte integrante de um projeto, estrutura ou sistema em engenharia civil”. Podem ser utilizados em obras de terra exercendo funções como reforço, drenagem, filtração, separação, proteção e controle de erosão.

### 2.2.1 – Tipos de Geossintéticos

A Tabela 2.1 resume os principais tipos (em negrito) e subtipos de geossintéticos existentes no mercado.

Tabela 2.1 – Principais tipos de geossintéticos (adaptado da IGS, 2000)

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Geotêxtil</b><br><b>[GT]</b>      | Produto têxtil bidimensional, permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica. |
| Geotêxtil não-tecido<br><b>[GTN]</b> | Composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente e interligados por processos mecânicos (Geotêxtil Agulhado [GTNa]), Térmicos (Geotêxtil Termoligado [GTNt]) ou químicos (Geotêxtil Resinado [GTNr]).   |
| Geotêxtil tecido<br><b>[GTW]</b>     | Composto pelo entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais de fabricação, denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal).  |
| Geotêxtil tricotado<br><b>[GTK]</b>  | Oriundo do entrelaçamento de fios por tricotamento.  |
| <b>Geobarra</b><br><b>[GB]</b>       | Produto em forma de barra com função predominante de reforço.  |
| <b>Geomembrana</b><br><b>[GM]</b>    | Produto bidimensional, de baixíssima permeabilidade, composto por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação.  |

Tabela 2.1 (cont.) – Principais tipos de geossintéticos (adaptado da IGS, 2000)

|  |   |
|--|---|
| Geomembrana reforçada<br>[GMR]                       | Geomembrana com armadura de reforço incorporada ao produto, formando um conjunto monolítico.  |
| Geomembrana texturizada<br>[GMT]                     | Geomembrana com acabamento superficial para aumentar as características de atrito de interface.   |
| <b>Geocomposto</b><br>[GC]                           | Produto industrializado, formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica. |
| Geocomposto argiloso para impermeabilização<br>[GCL] | Estrutura formada pela associação de geossintéticos a um material argiloso de baixa condutividade hidráulica, especialmente desenvolvido para função de impermeabilização.                  |
| Geocomposto para drenagem<br>[GCD]                   | Produto desenvolvido para drenagem, composto de geotêxtil (função de filtro) e georrede ou geoespaçador.  |
| Geocomposto de reforço<br>[GCR]                      | Estrutura formada pela associação de geossintéticos não similares, desenvolvidos para reforço.  |
| <b>Geotira</b><br>[GI]                               | Produto em forma de barra com função predominante de reforço.   |
| <b>Geoespaçador</b><br>[GS]                          | Produto com estrutura tridimensional que apresenta grande volume de vazios, com função drenante.  |
| <b>Georrede</b><br>[GN]                              | Produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem.  |
| <b>Geotubo</b><br>[GP]                               | Produto tubular com função drenante.  |
| <b>Geomanta</b><br>[GA]                              | Produto com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão superficial do solo. Também conhecido como biomanta, quando biodegradável.                                    |

Tabela 2.1 (cont.) – Principais tipos de geossintéticos (adaptado da IGS, 2000)

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Geocélula<br/>[GL]</b>    | Produto com estrutura tridimensional aberta, constituída de células interligadas, com função predominante de reforço e controle de erosão.   |
| <b>Geogrelha<br/>[GG]</b>    | Estrutura em forma de grelha constituída por elementos resistentes à tração com função de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas. Considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração em uma das direções principais. |
| Geogrelha extrudada<br>[GGE] | Formada por processos de extrusão e estiramento em um único sentido (geogrelha unidirecional) ou nos dois sentidos (geogrelhas bidirecional).  |
| Geogrelha soldada<br>[GGB]   | Estrutura plana obtida da soldadura de geotiras compostas por filamentos de poliéster, revestidos em polietileno ou PVC, de alto módulo elástico e excelente comportamento à fluência.   |
| Geogrelha tecida<br>[GGW]    | Estrutura plana construída de fibras sintéticas (geralmente poliéster), tricotadas ou intertecidas nas juntas, recobertas por uma capa protetora.  |

### 2.2.2 – Principais Aplicações dos Geossintéticos

É cada vez maior a utilização de geossintéticos em obras geotécnicas. Eles vem substituindo os materiais de construção tradicionais, ou como reforço destes, com vantagens econômicas. Porém, é importante ressaltar que o geossintético ao substituir um material deve atender as mesmas funções em termos de durabilidade, permeabilidade, deformabilidade e resistência.

A Tabela 2.2 resume as principais aplicações dos geossintéticos. Em uma mesma aplicação, um geossintético pode desempenhar uma ou mais funções. Sendo assim, ao se selecionar um determinado tipo de geossintético, deve-se definir quais serão suas funções e após hierarquizá-las. Desta forma, pode-se definir quais as características que o geossintético deve possuir para desempenhar as funções definidas.

A Tabela 2.3 resume as principais aplicações dos geossintéticos em função dos diferentes tipos.

Tabela 2.2 – Principais aplicações dos geossintéticos

| <b>Aplicação</b>   | <b>Objetivos</b>   |
|--------------------|--|
| 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 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 2.3 – Tipos de geossintéticos e suas Principais Aplicações (Sieira, 2003)

| Geossintético  | Aplicação |           |          |          |           |                   |                    |
|----------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-------------------|--------------------|
|                | Reforço   | Filtração | Drenagem | Proteção | Separação | Impermeabilização | Controle de Erosão |
| Geotêxtil      | <b>X</b>  | <b>X</b>  | <b>X</b> | <b>X</b> | <b>X</b>  |                   | <b>X</b>           |
| Geogrelhas     | <b>X</b>  |           |          |          |           |                   |                    |
| Geomembranas   |           |           |          |          | <b>X</b>  | <b>X</b>          |                    |
| Geocompostos   | <b>X</b>  |           | <b>X</b> |          |           | <b>X</b>          |                    |
| Geobarras      | <b>X</b>  |           |          |          |           |                   |                    |
| Geoespaçadores |           |           | <b>X</b> |          |           |                   |                    |
| Geotiras       | <b>X</b>  |           |          |          |           |                   |                    |
| Georredes      |           |           | <b>X</b> |          |           |                   |                    |
| Geotubos       |           |           | <b>X</b> |          |           |                   |                    |
| Geomantas      |           |           |          |          |           | <b>X</b>          | <b>X</b>           |
| Geocélulas     | <b>X</b>  |           |          |          |           |                   | <b>X</b>           |

### 2.2.3 – Materiais Constituintes dos Geossintéticos

Os polímeros são em geral, os constituintes dos materiais geossintéticos. Entre os polímeros mais empregados estão o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliéster (PET) e a poliamida (PA).

A composição química e a estrutura do polímero condicionam as propriedades finais do geossintético. Estas podem ser modificadas através da introdução de aditivos durante o processo de fabricação. A Tabela 2.4 resume as propriedades das principais tipos de polímeros.

Tabela 2.4 – Propriedades dos polímeros (Lopes, 2001)

| Propriedades           |                  |                  | Poliéster | Poliamida | Polipropileno | Polietileno |
|------------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|---------------|-------------|
| Resistência            |                  |                  | E         | M         | B             | B           |
| Módulo de Elasticidade |                  |                  | E         | M         | B             | B           |
| Deformação na Ruptura  |                  |                  | M         | M         | E             | E           |
| Fluência               |                  |                  | B         | M         | E             | E           |
| Densidade relativa     |                  |                  | E         | M         | B             | B           |
| Custo                  |                  |                  | E         | M         | B             | B           |
| Resistência            | Radiações UV     | Estabilizado     | E         | M         | E             | E           |
|                        |                  | Não estabilizado | E         | M         | M             | B           |
|                        | Bases            |                  | B         | E         | E             | E           |
|                        | Micro-Organismos |                  | M         | M         | M             | E           |
|                        | Óleos            |                  | M         | M         | B             | B           |
|                        | Detergentes      |                  | E         | E         | E             | E           |

E – Elevado, M – Médio, B – Baixo.

### 2.2.4 – Propriedades Físicas e Hidráulicas dos Geossintéticos

As principais propriedades físicas e hidráulicas dos geossintéticos são representadas por:

(i) Massa por unidade de área ou gramatura,  $M_A$  ( $g/m^2$ )

A massa por unidade tem valores usuais de 100 a 300 $g/m^2$  para geotêxteis tecidos, 100 a 400 $g/m^2$  para os não tecidos e 200 a 1000 $g/m^2$  para geogrelhas. Alguns geotêxteis tecidos e não tecidos podem ter gramaturas superiores a 1000 $g/m^2$ .

(ii) Espessura nominal,  $t_{GT}$  (mm)

A espessura nominal é definida como sendo a distância entre as duas superfícies, inferior e superior, medida para uma dada pressão. Em geral, considera-se uma pressão de 2kPa, na sua determinação. Os valores usuais situam-se entre 0,2 e 5,0mm para os geotêxteis não tecidos, 0,2 e 1,5mm para geotêxteis tecidos e entre 1 e 5mm para as geogrelhas.

(iii) Porosidade,  $n_{GT}$  (%)

É usualmente determinada em função da gramatura ( $M_A$ ) e da espessura ( $t_{GT}$ ) do geossintético, da densidade ( $\rho_f$ ) do filamento e da massa específica da água ( $\gamma_a$ ) a 4°C, segundo a expressão:

$$n_{GT} = 1 - \frac{M_A}{t_{GT} \times \rho_f \times \gamma_a} \quad (2.1)$$

(iv) Distribuição e dimensão das aberturas

A distribuição e dimensão das aberturas são fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros e separadores.

Materiais como geotêxteis (tecidos e não tecidos) não apresentam um tamanho único de aberturas, mas sim um intervalo de tamanhos. A forma de representação desse intervalo é análoga à usada para representar a granulometria dos solos e denomina-se de porometria. Em geral, seu diâmetro é expresso em mm ou em  $\mu\text{m}$  e seus valores usuais estão entre 0,06 e 0,15mm para geotêxteis não tecidos e entre 0,05 e 1,50mm para os geotêxteis tecidos.

(v) Permissividade,  $\Psi$  ( $\text{s}^{-1}$ )

A permissividade é a maneira usual de expressar a facilidade de um fluido atravessar um meio. É definida como sendo a razão entre a permeabilidade normal  $k_n$  ao plano do geossintético e a espessura  $t$ :

$$\Psi = \frac{k_n}{t} \quad (2.2)$$

A permissividade depende da estrutura das aberturas (distribuição e dimensão), apresentando, usualmente, valores de 0,05 a  $0,5s^{-1}$  para geotêxteis tecidos e 0,2 a  $2,5s^{-1}$  para os não tecidos.

(vi) Transmissividade,  $\theta$  ( $m^2/s$ )

As condições de escoamento no plano de uma manta geossintética são caracterizadas pela transmissividade. Ela é definida como o produto entre a condutividade hidráulica no plano  $k_p$  e a espessura do geossintético  $t$ :

$$\theta = k_p \times t \quad (2.3)$$

A transmissividade depende da espessura ( $e$ , portanto, das pressões aplicadas ao geossintético) e da distribuição e dimensão das aberturas. Nos geotêxteis tecidos e não tecidos termicamente ligados a transmissividade é pequena. Nos geotêxteis não tecidos agulhados, o parâmetro  $\theta$  é elevado, justificando sua utilização como elemento drenante.

## 2.2.5 – Propriedades Mecânicas dos Geossintéticos

Os geossintéticos estão sujeitos a solicitações mecânicas durante sua vida útil. Na instalação, eles são solicitados à tração, à penetração, à perfuração, a danos de instalação e à abrasão. Na vida útil da obra, estão sujeitos à tração, à penetração, à perfuração, ao deslizamento na interface, ao arrancamento e à fluência.

(i) Resistência à tração

A resistência à tração não confinada de geossintéticos é determinada a partir de ensaios de faixa larga. Segundo a norma brasileira (NBR 12824/93), estes ensaios devem ser executados com corpos de prova de 200mm de largura e 100mm de comprimento, submetidos a um esforço de tração sob velocidade de deslocamento (extensão) de 200mm/min. A dimensão de comprimento refere-se à distância entre as duas garras, localizadas nas extremidades da amostra de geossintético.

O valor da resistência é condicionado pelo tipo de polímero constituinte, estrutura, processo de fabricação e outros fatores. No caso das geogrelhas, não é possível definir previamente as dimensões das amostras. Como este tipo de geossintético possui uma malha aberta, deve ser feito um estudo prévio para definir as dimensões representativas ótimas para a realização dos ensaios (Sieira, 2003).

As geomembranas ainda não possuem uma norma estabelecida. Existe uma proposta para a utilização de corpos de prova com as mesmas dimensões dos geotêxteis (ASTM) e outra utilizando corpos de prova em forma de alteres (AFNOR).

O resultado deste ensaio é expresso em gráficos de força por unidades de comprimento (kN/m) vs deformação longitudinal (%). A partir dela, pode-se obter o módulo de rigidez, a resistência e a deformação na ruptura.

#### (ii) Resistência à penetração por punção

A resistência ao punção é definida como a medição da vulnerabilidade dos geossintéticos a compressões diferenciais ou a choques provocados pela queda de materiais. Esta solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica.

De acordo com a norma NBR 13359/95, a resistência à penetração por punção estático é determinada utilizando-se punção tipo CBR. O procedimento adotado aplica-se a geotêxteis, geomembranas e produtos correlatos de pequena a média abertura.

#### (iii) Resistência da Interface Solo-Geossintético

Os parâmetros de resistência de interface (adesão e ângulo de atrito de interface) são geralmente obtidos de ensaios de cisalhamento direto, arrancamento ou rampa. A escolha do ensaio mais adequado vai depender do movimento relativo entre o geossintético e a massa de solo. Esta propriedade mecânica é apresentada em detalhes no item 2.3.

#### (iv) Fluência

A fluência pode ser definida como a aptidão de um material ao alongamento quando submetido a um carregamento estático de longa duração (Sieira, 2003). Os materiais poliméricos são sujeitos à fluência podendo sofrer alterações em suas propriedades ao longo do tempo. O poliéster e a poliamida apresentam baixa

susceptibilidade à fluência, enquanto o polipropileno e o polietileno são mais suscetíveis.

A fluência de um material é associada à porcentagem de carga máxima e à temperatura em que se encontra.

### 2.3 – INTERAÇÃO SOLO -GEOSSINTÉTICO

No dimensionamento de obras de solo reforçado, é de fundamental importância o conhecimento acurado dos parâmetros de interação entre o solo e o geossintético. Os métodos usualmente utilizados para a avaliação destes parâmetros são os ensaios de campo e laboratório. Dentre os ensaios de laboratório, são utilizados os ensaios de cisalhamento direto, tração confinada, arrancamento e, mais recentemente, o ensaio de rampa. A justificativa para a escolha de um ou outro ensaio depende do tipo de movimento relativo entre o geossintético e a massa de solo.

A interação entre o solo e geossintético vem sendo amplamente estudada. Seu estudo, entretanto, revela-se complexo devido à grande variedade de modos de interação. A Figura 2.1, apresenta uma seção típica de muro, ilustrando os modos possíveis de interação solo-geossintético.

Os modos de sollicitações são atrito na interface (A), tração no reforço (B) e arrancamento (C).

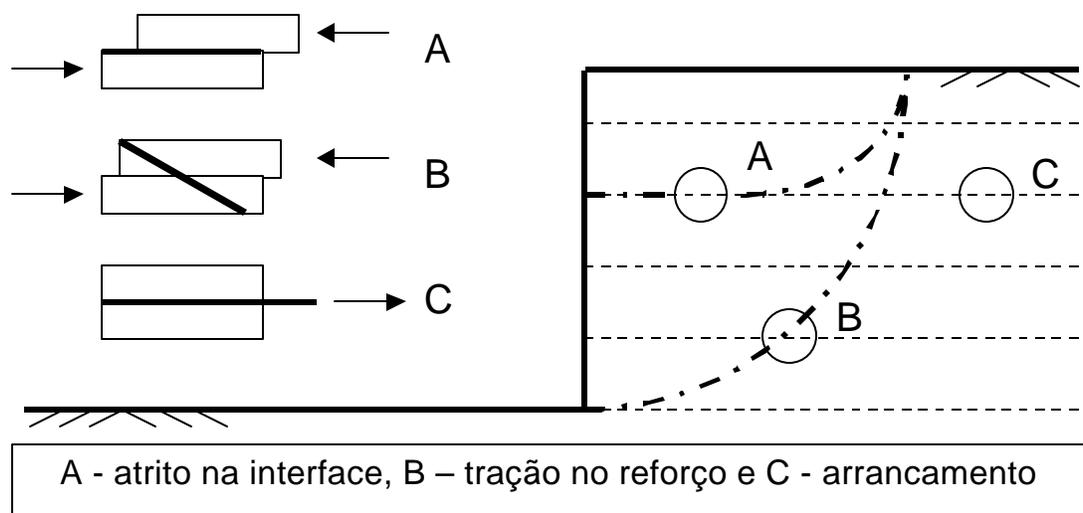


Figura 2.1 – Modos de interação entre o solo e o geossintético.

#### (i) Atrito na Interface Solo-Reforço

Neste caso tem-se a massa superior de solo deslocando-se em relação ao geossintético e o ensaio recomendado é o de cisalhamento direto. As tensões desenvolvidas são função das deformações no solo imediatamente adjacente ao reforço e do deslizamento que se origina no contato entre ambos. À medida que ocorre o deslizamento, verifica-se a formação de planos de ruptura paralelos à direção do reforço, cuja localização depende das características de deformação e de sua geometria. Se a inclusão for áspera, com reentrâncias, os planos de ruptura tenderão a se formar no solo. Se a superfície da inclusão for lisa, e o material que a constitui pouco rígido, a ruptura tenderá a ocorrer no contato, através do deslizamento dos grãos de solo ao longo da interface (Castro, 1999).

#### (ii) Tração no Reforço

O ponto de maior esforço de tração ocorre onde a superfície de ruptura intercepta o reforço. A maneira de simular esta situação em laboratório consiste em colocar o reforço com uma inclinação específica dentro de uma caixa de cisalhamento direto.

#### (iii) Arrancamento do Reforço

O arrancamento do reforço da massa de solo ocorre quando os esforços de tração aplicados neste, são superiores à resistência que o solo que o circunda oferece ao deslocamento relativo entre ambos. Similarmente ao que ocorre na condição de atrito de interface, são diversos os fatores que influenciam o mecanismo de transferência de tensões, e o ensaio utilizado para esta análise é o ensaio de arrancamento.

Os parâmetros que exprimem a resistência de interface entre o solo e o geossintético são a adesão ( $a$ ) e o ângulo de atrito de interface ( $\phi_{sg}$ ). A resistência pode ser escrita como:

$$\tau = a + \sigma \times \tan \phi_{sg} \quad (2.4)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de aderência entre solo e reforço;

$a$  = adesão entre o solo e o reforço;

$\sigma$  = tensão normal atuante sobre o plano do reforço;

$\phi_{sg}$  = ângulo de atrito entre o solo e o reforço.

Os valores de  $a$ ,  $\phi_{sg}$  e  $\sigma$  podem ser obtidos em termos de tensões totais ou efetivas.

## 2.4 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE INTERFACE SOLO-GEOSSINTÉTICO

Os ensaios normalmente utilizados são os de arrancamento e cisalhamento direto. Porém, tem sido observado mais recentemente o emprego de ensaios de plano inclinado e ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado.

### 2.4.1 – Cisalhamento Direto

Neste tipo de ensaio, o solo colocado na parte superior da caixa que desliza sobre o geossintético é sujeito à ação de uma tensão normal constante. A parte inferior da caixa pode estar preenchida com solo ou constituir um suporte rígido (Figura 2.2).

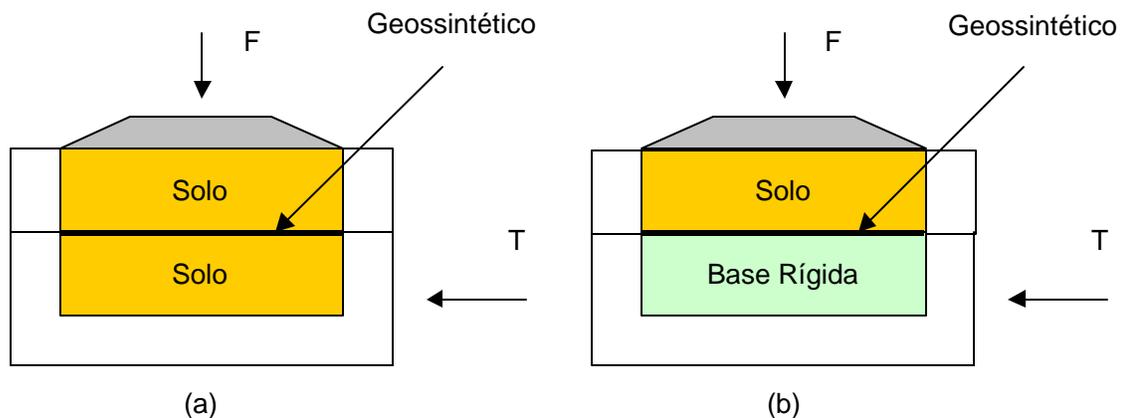


Figura 2.2 – Ensaio de cisalhamento direto: (a) Geossintético entre duas camadas de solo e (b) Geossintético colado em base rígida.

A base rígida é utilizada na maioria dos ensaios 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 da opção por solo nas duas caixas, 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.

Para geogrelhas, é interessante utilizar as duas caixas preenchidas com solo. 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.

O ensaio é repetido para diferentes tensões normais, a fim de definir uma relação entre tensões cisalhantes e normais (Figura 2.3). A partir da envoltória de resistência, obtém-se os parâmetros de resistência da interface, adesão  $a$  e ângulo de atrito solo-geossintético  $\phi_{sg}$ .

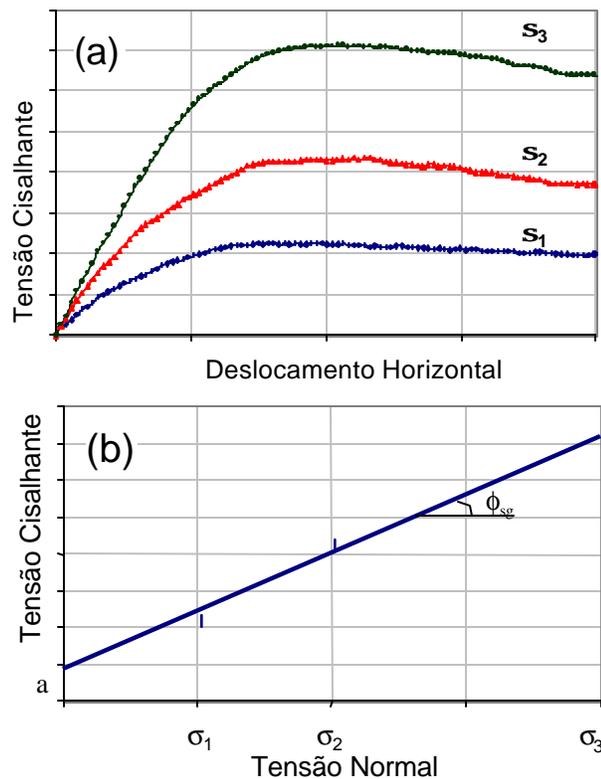


Figura 2.3 – Obtenção dos parâmetros de resistência da interface (Sieira, 2003).

Os ensaios de cisalhamento direto não oferecem grande dificuldade de interpretação. 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 métodos para controle da pressão vertical.

A influência da posição relativa solo-geossintético tem sido estudada por diversos autores (Ingold, 1984; Nakamura et al., 1999; Saez, 1997). Nakamura et al. (1999) recomendam a utilização da base rígida para obtenção de parâmetros de

interface solo-geogrelha. Ingold (1984) e Saez (1997), porém, concluíram que ao se utilizar a base rígida, o atrito solo-solo é desconsiderado e, portanto obtém-se parâmetros de interface menores (Figura 2.4).

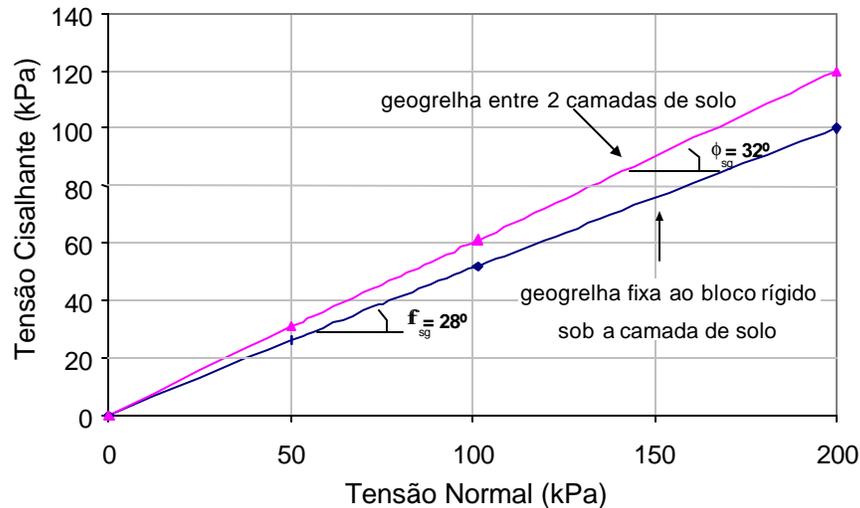


Figura 2.4 – Efeito da montagem do ensaio de cisalhamento direto (Adaptado Saez, 1997).

As divergências apresentadas por Ingold (1984), Nakamura et al. (1999) e Saez (1997) podem estar relacionadas ao tipo de malha da geogrelha. Espera-se que, quanto menor for a área da geogrelha disponível para o atrito na interface solo-geogrelha, maior será 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 do uso de bloco rígido pode ser adequada (Sieira, 2003).

Em relação à influência das dimensões do equipamento, normalmente os ensaios de cisalhamento direto utilizam caixas de ensaio com dimensões variando de 60mm de aresta até 1000mm. As caixas podem ter tamanhos iguais ou a caixa inferior pode ser maior que a superior, permitindo grandes deslocamentos.

Jewell e Wroth (1987) recomendam que a menor dimensão da caixa de ensaio deva ser, no mínimo, 50 vezes o diâmetro médio das partículas de solo. A ASTM D3080 sugere que a relação seja de 12 vezes.

O efeito das dimensões do equipamento em relação às aberturas de geogrelhas foi estudado por Ingold (1984) e Saez (1997). Os autores executaram ensaios com geogrelhas em areia, em duas caixas de cisalhamento direto, com

arestas de 60 e 300mm. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Figura 2.5. Observa-se que no equipamento de menores dimensões, a envoltória obtida não é linear, sugerindo uma dependência entre o ângulo de atrito solo-geogrelha e a tensão normal. No entanto, no equipamento de maiores dimensões, nota-se que a envoltória de resistência é linear e que o valor de  $\phi_{sg}$  independe da tensão normal. Além disso, a envoltória obtida no ensaio com equipamento de 60mm encontra-se acima da envoltória obtida no equipamento de 300mm. Os autores sugerem a adoção de equipamentos com dimensões mínimas de 300x300mm<sup>2</sup>.

Gourc et al. (1996) também recomendam a utilização de equipamentos de cisalhamento direto com dimensões iguais ou superiores a 300x300mm<sup>2</sup>, sobretudo para ensaios com geogrelhas.

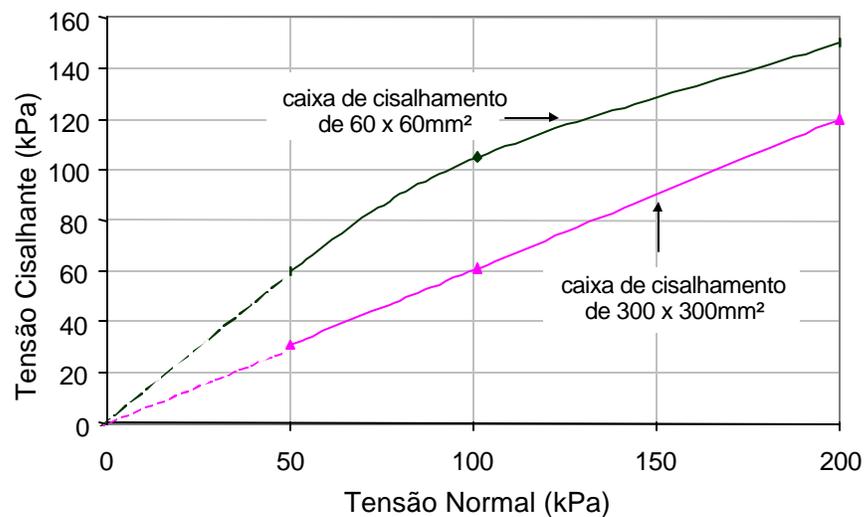


Figura 2.5 – Efeito das dimensões do equipamento de ensaios de cisalhamento direto para geogrelha (Adaptado de Saez, 1997).

Gourc et al. (1996) estudaram a influência da espessura da camada de solo nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto em interface solo-geotêxtil em areia. Concluíram que um aumento da espessura da camada de solo resulta em um aumento da tensão de corte, porém o atrito lateral solo-caixa também aumenta.

Quanto à rugosidade do bloco, este é um dos fatores que pode influenciar o resultado de ensaios de cisalhamento direto, principalmente no caso de geogrelhas com grande aberturas.

Gourc et al. (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto com uma geogrelha de barras espessas, sobre um suporte liso e sobre uma camada de areia

como suporte alternativo. Os resultados demonstraram que a resistência era 20% maior no segundo caso. Eles recomendam a colagem de um material rugoso, previamente definido, buscando uma rugosidade semelhante à do solo.

#### 2.4.2 – Ensaio de Cisalhamento Direto com Reforço Inclinado

Este ensaio, esquematizado na Figura 2.6, simula a condição B da Figura 2.1, onde as tensões cisalhantes na interface são absorvidas pelo reforço, que é então tracionado.

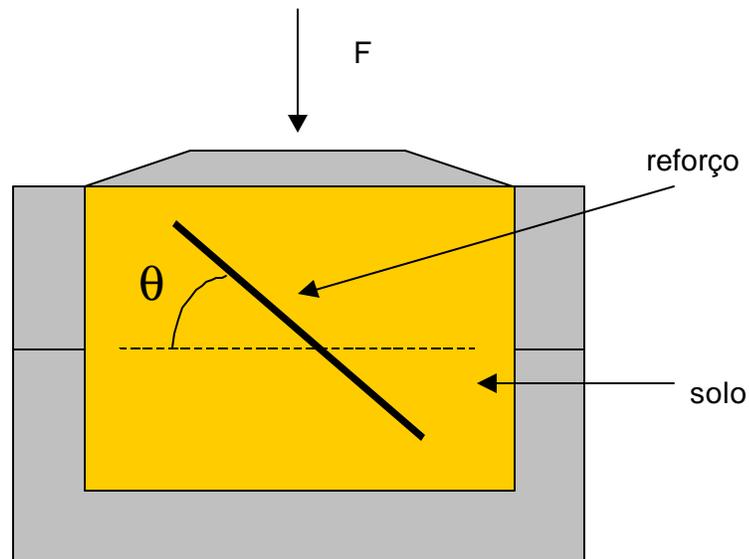


Figura 2.6 – Ensaio de cisalhamento com reforço inclinado.

Jewell e Wroth (1987) e Jewell (1990) sugerem que este ensaio seja realizado com amostras maiores que as convencionais, com reforço colocado na vertical ou inclinado de um ângulo  $\theta$  em relação a esta direção e tendo um comprimento igual na parte superior e inferior da caixa de corte.

Palmeira (1999), através de ensaios com geogrelhas inclinadas imersas em areia, conclui que o maior ganho de resistência ocorre para um ângulo de cerca de  $64^\circ$ . Isto foi explicado pelo fato de que a orientação de  $60^\circ$  com a horizontal coincidia 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. Tal fato foi também constatado por Ingold (1981) e Sieira et al. (2002).

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 50kPa 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 ( $\phi_{sg}$ ) 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 ( $\phi$ ). No entanto, à medida que se aumenta a tensão normal, o valor de  $\phi_{sg}$  diminui, tornando-se ligeiramente inferior ao valor de  $\phi$ .

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.

### **2.4.3 – Ensaios de Arrancamento**

O ensaio de arrancamento 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)

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.

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

$$\tau_{sg} = \frac{P}{2 \times B \times L} \quad (2.5)$$

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  $\phi_{sg}$ ).

Porém, é importante ressaltar que os valores dos 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. A Tabela 2.5 apresenta alguns destes equipamentos.

Tabela 2.5 - Características dos equipamentos de arrancamento (Teixeira, 1999)

| Referências               | Características dos Equipamentos |              |                  |                       |  |
|---------------------------|----------------------------------|--------------|------------------|-----------------------|--|
|                           | Altura (mm)                      | Largura (mm) | Comprimento (mm) | Sistema de Sobrecarga | Medidas Efetuadas  |
| Ingold (1983)             | 300                              | 285          | 500              | Colchão de água       | Força de arrancamento, deslocamento e volume   |
| Palmeira (1987)           | 1000                             | 1000         | 1000             | Colchão de água       | Força de arrancamento, deslocamentos, tensões, deformações no reforço e medidas internas no solo |
| Christopher e Berg (1990) | 310                              | 600          | 12200            | Colchão de ar         | Força de arrancamento e deslocamentos  |

Tabela 2.5 (cont.) - Características dos equipamentos de arrancamento (Teixeira, 1999)

| Referências            | Características dos Equipamentos |              |                  |                       |  |
|------------------------|----------------------------------|--------------|------------------|-----------------------|--|
|                        | Altura (mm)                      | Largura (mm) | Comprimento (mm) | Sistema de Sobrecarga | Medidas Efetuadas  |
| Farrag et al. (1993)   | 760                              | 900          | 1520             | Colchão de ar         | Força de arrancamento, deslocamento e velocidade             |
| Alfaro et al. (1995)   | 400                              | 600          | 1500             | Colchão de ar         | Força de arrancamento, deslocamento, deformação e dilatância |
| Chang et al. (1995)    | 150                              | 500          | 400              | Colchão de ar         | Força de arrancamento, deslocamento e deformação             |
| Lopes e Ladeira (1996) | 600                              | 1000         | 1530             | Macacos Hidráulicos   | Força de arrancamento e deslocamento                         |
| Miyata (1996)          | 220                              | 325          | 660              | Colchão de ar         | Força de arrancamento, deslocamento e dilatância             |
| Castro (1999)          | 1000                             | 1000         | 1000             | Macacos Hidráulicos   | Força de arrancamento, deslocamento e deformação             |

Nota-se, na Tabela 2.5, que o confinamento é aplicado na maioria das vezes por meio de colchão de ar. As dimensões dos equipamentos variam significativamente, apresentando valores médios de 1000mm de comprimento, 800mm de largura e 500mm de altura.

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 ou manga para proteger a extremidade frontal do geossintético.

Lopes e Ladeira (1996) estudaram a influência da presença da manga em ensaios de arrancamento. Para isto utilizaram uma manga de aço inoxidável de 200mm de comprimento. Seus resultados são apresentados na Figura 2.7. Além de um ganho de 10% na força de arrancamento máxima, verifica-se, também, que os deslocamentos para ensaios sem manga são menores, o que concorda com o aumento da resistência da interface. Diante destes resultados, é aconselhável a utilização de mangas nos ensaios de arrancamento.

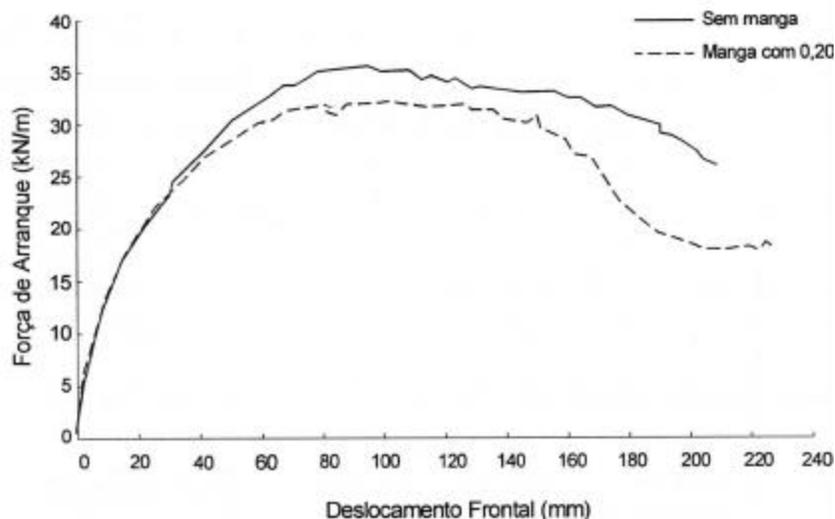


Figura 2.7 – Influência da manga nos ensaios de arrancamento (Lopes e Ladeira, 1996).

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).

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) 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) ressaltam a importância de normalização do procedimento de densificação das amostras.

#### **2.4.4 – Ensaio de Rampa**

Os ensaios normalmente empregados na obtenção de parâmetros de interface são o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de arrancamento. Porém, para situações de campo como sistemas de controle de erosão e sistemas de impermeabilização, estes ensaios podem conduzir a erros. Estes erros estão associados à incorreta representação do mecanismo de solitação do geossintético, no caso do ensaio de arrancamento, ou a 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 representam uma alternativa para modelar problemas de estabilidade de camadas superficiais de geossintéticos em taludes muito inclinados (Figura 2.8). São considerados como um ensaio de qualificação em que é possível reproduzir, por exemplo, a estabilidade de um sistema multicamadas ou a fluência das interfaces, para tensões normais reduzidas (Gourc et al., 1996).

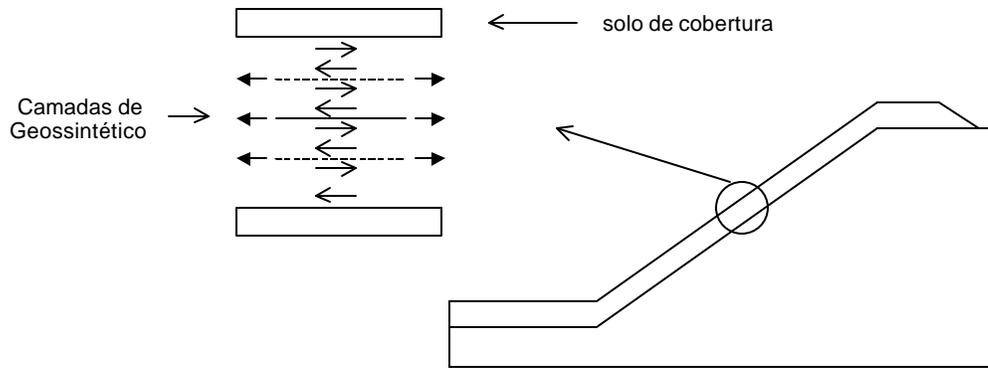


Figura 2.8 – Esquema de talude de disposição de resíduos com sistemas multicamadas de geossintéticos (Adaptado Mello et al.,2003).

O ensaio de rampa caracteriza-se por ser um ensaio rápido e simples que permite a determinação do comportamento ao cisalhamento para baixas tensões normais.

A norma ISO 12957-2 apresenta diversas recomendações para a execução do ensaio de rampa além das dimensões mínimas da caixa de ensaio e dos equipamentos necessários para monitoração do ensaio (Figura 2.9).

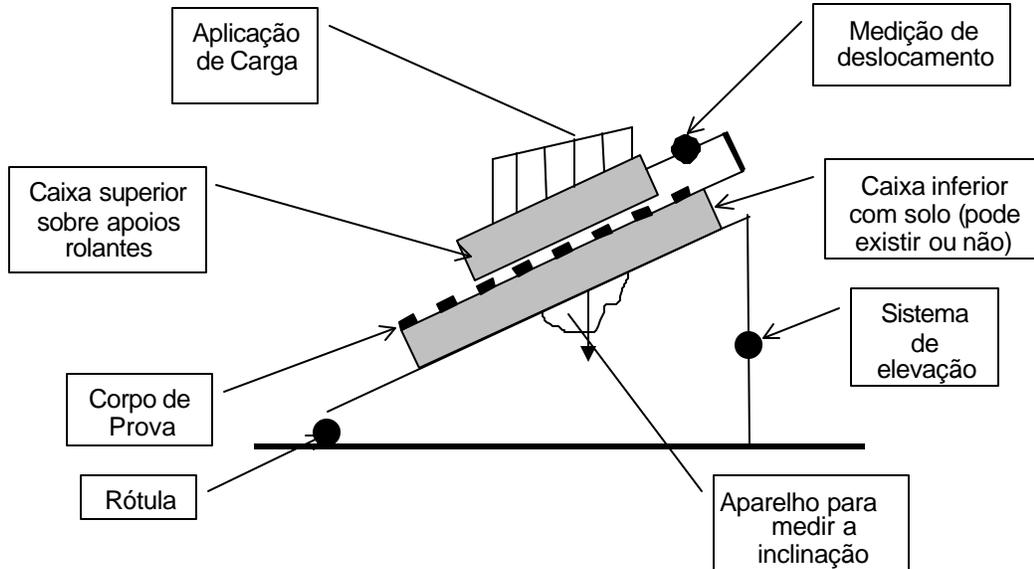


Figura 2.9 – Representação esquemática do equipamento de ensaio de rampa (Adaptado da ISO 12957-2).

(i) Mecânica do ensaio de Rampa

A mecânica do ensaio de rampa é simples, como pode ser observado na Figura 2.10. 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 1m<sup>2</sup>.

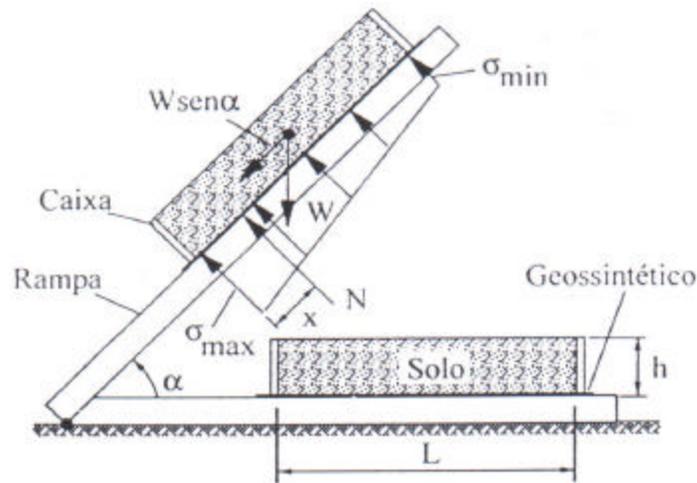


Figura 2.10 – Mecânica do Ensaio de Rampa (Mello et al., 2003).

Para uma situação geral, a equação que define a mecânica do ensaio de rampa é a mesma Equação 2.4 apresentada anteriormente.

A tensão normal média atuando sobre a superfície de contato solo-geossintético é definida como:

$$\sigma = \frac{W \times \cos \alpha}{A} \quad (2.6)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão normal média que atua na interface;

$W$  = peso da amostra;

$A$  = área de contato solo-geossintético;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da rampa.

Para se obter os parâmetros de interface solo-geossintético ( $a$  e  $\phi_{sg}$ ), basta construir a envoltória de resistência utilizando-se no mínimo três tensões de confinamento diferentes.

(ii) Restrições do Ensaio de Rampa

Mello 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 (Figura 2.10) 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) admitem que a distribuição das tensões assume uma forma trapezoidal e seus valores máximo e mínimo são obtidos através das seguintes relações:

$$\frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma} = 4 - \frac{6x}{L} \quad (2.7)$$

$$\frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma} = \frac{6x}{L} - 2 \quad (2.8)$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\cos[\alpha + \tan^{-1}(h/L)]}{2 \cos \alpha} \times [1 + (\frac{h}{L})^2]^{1/2} \quad (2.9)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = tensão normal máxima;

$\sigma_{m\acute{i}n}$  = tensão normal mínima;

$\sigma$  = tensão normal média;

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

$\alpha$  = 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 2.7 a 2.9 indicam que as dimensões da amostra afetam significativamente nos valores da tensão máxima e mínima atuantes, sendo fatores de influência importantes em equipamentos de pequenas dimensões.

Mello et al. (2003) realizaram uma série de simulações numéricas para analisar a influência do tamanho da amostra na distribuição de tensões. A Figura 2.12, baseada em Palmeira et al. (2002), apresenta a variação da tensão normal vs comprimento normalizado ( $L = 0,5, 2$  e  $10\text{m}$ ) para inclinações de  $15^\circ$  e  $25^\circ$ . A comparação entre os resultados teóricos (Equações 2.7 a 2.9) e os resultados obtidos pela simulação numérica mostra uma boa concordância. Porém, deve-se ressaltar que, para comprimentos de  $0,5\text{m}$ , a diferença de valor entre a tensão máxima e mínima pode chegar a cinco vezes.

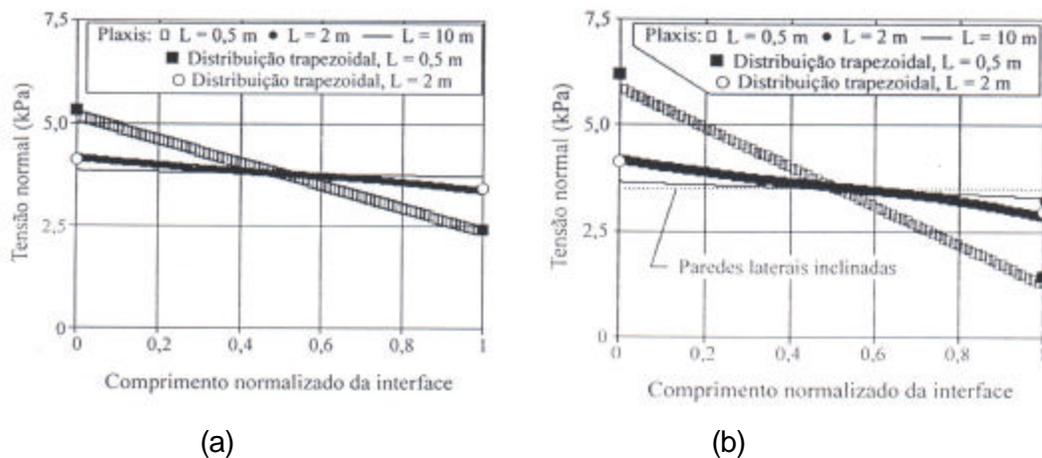


Figura 2.11 – Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado: (a) Inclinação de  $15^\circ$  e (b) Inclinação de  $25^\circ$  (Mello et al., 2003).

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 Mello et al. (2003) que recomendam a utilização de caixas de ensaios com relação comprimento-altura elevada.

### (iii) Equipamentos para 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 2.13, 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 sobre 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.

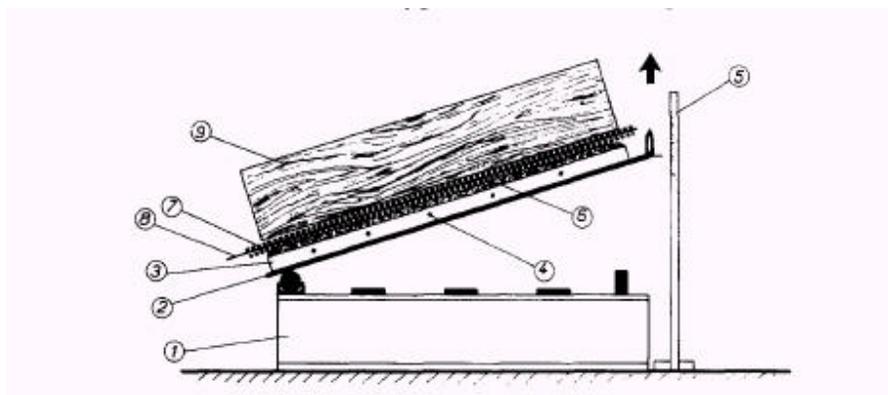


Figura 2.12 – Equipamento de rampa do CEMAGREF (Girard et al., 1990).

Izgin (1997) propõe um aparelho com dimensões de rampa de 600mm de comprimento x 490mm de largura x 25mm de espessura (Figura 2.13). 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 à 25kPa. O sistema de inclinação de rampa é composto por um compressor de ar comprimido que aciona um sistema hidráulico. Não se tem certeza sobre as velocidades de inclinação que podem ser aplicadas por este sistema. Porém, Wasti & Özdüzgün (2001) reportam uma velocidade 3mm/min. Não há informações sobre os sistemas de medição de deslocamento horizontal e de inclinação.

O equipamento desenvolvido por Lima Jr. (2000), ilustrado na Figura 2.14 apresenta dimensões internas da caixa de confinamento de solo iguais a 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, 5,75kPa.

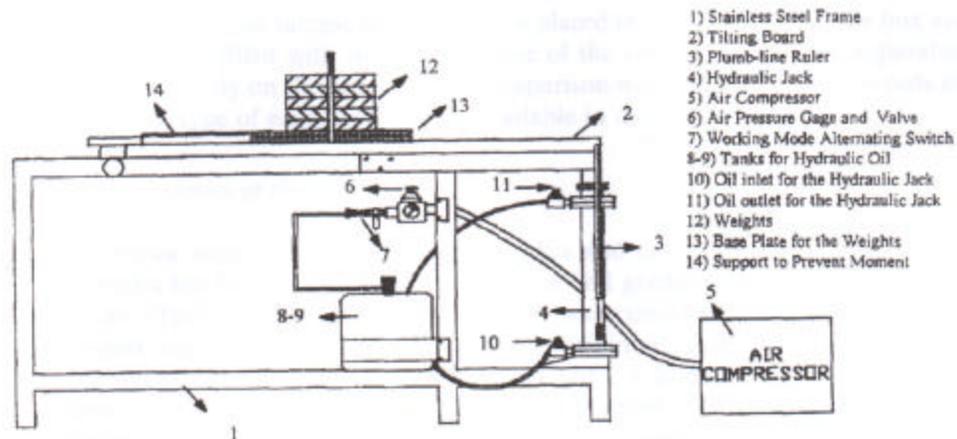


Figura 2.13 – Equipamento de rampa da Universidade de Ankara (Izgin e Wasti, 1998).

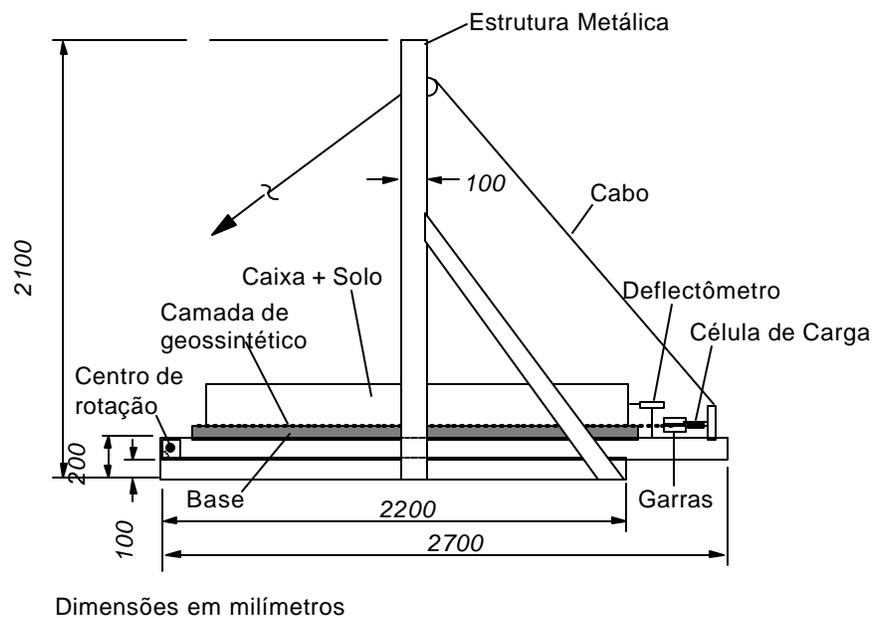


Figura 2.14 – Equipamento de rampa da Universidade de Brasília (Mello et al., 2003).

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 2.15).

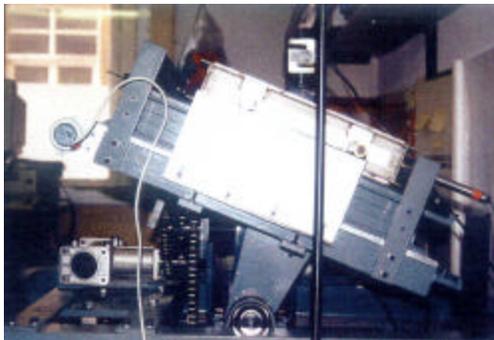


Figura 2.15 – Equipamento de rampa da Universidade do Porto (Lopes, 2001).

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  $0,5^{\circ}/\text{min}$ . 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 elétrico e um inclinômetro elétrico, respectivamente. A tensão de confinamento é aplicada por um sistema análogo ao do ensaio cisalhamento direto convencional, composto por um pendural anexado a uma célula de carga.

Briançon et al. (2002) propõem um equipamento de rampa composto por duas caixas de ensaio (Figura 2.16). A inferior tem dimensões de 2m 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 (1mx1m). 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.

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 de deslocamento eletrônicos, células de carga e inclinômetros.



Figura 2.16 - Equipamento de rampa da Universidade de Bordeaux (Briançon et al., 2002)

Narejo (2003) apresenta um equipamento de rampa, desenvolvido para determinar o ângulo de atrito de interfaces geossintético-geossintético (Figura 2.17). 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 2,2kPa. A velocidade de inclinação é da ordem de 5°/min. A inclinação da rampa é monitorada por um medidor de ângulo de base magnética.

#### (iv) Resultados de Ensaio de Rampa

São apresentados vários resultados de ensaio de rampa na bibliografia. As análises vão desde um simples estudo de interface, passando pela comparação com

ensaios de cisalhamento e arrancamento, até complexos arranjos para estudos multi-camadas.

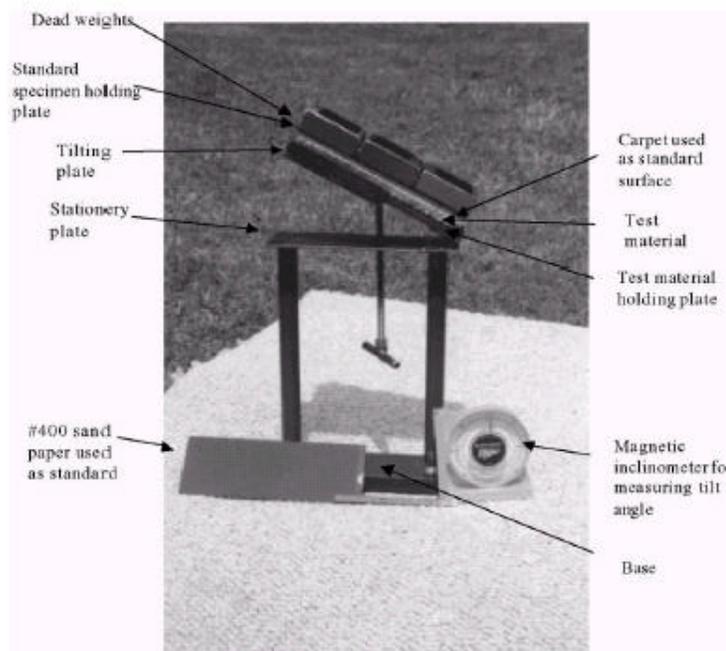


Figura 2.17 – Equipamento de rampa GSE Lining Technology (Narejo, 2003).

Giroud et al. (1990), Girard et al. (1990) e Koutsourais et al. (1998) constataram, para diferentes tipos de geossintéticos, que o ensaio de rampa realizado sob baixas tensões normais conduz, em algumas situações, a ângulos de atrito da interface inferiores aos determinados em ensaios de cisalhamento direto. Provavelmente, estes valores devem ser mais realistas. Com base nos resultados obtidos até o momento, não é possível estabelecer para diferentes tipos de interfaces, um comportamento geral no que diz respeito à comparação de resultados de ensaios de cisalhamento direto e rampa (Lopes, 2001).

Izgin e Wasti (1998) estudaram a resistência ao cisalhamento da interface areia-geomembrana através de ensaios de cisalhamento direto convencionais e em plano inclinado. Os materiais utilizados foram uma geomembrana lisa, uma rugosa (ambas de PEAD) e duas areias. Os resultados dos ensaios em interfaces de 60x60mm de área de contato são resumidos na Tabela 2.6.

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados sob tensões normais de 14, 25, 50, 100 e 200kPa. Os ensaios de rampa foram realizados sob tensões confinantes ( $\sigma_c$ ) de 25, 50 e 100kPa. A Tabela 2.6 apresenta valores de inclinação

máxima de rampa ( $\alpha$ ) para cada ensaio de rampa, além da adesão ( $a$ ) e ângulo de atrito de interface ( $\phi_{sg}$ ), obtidos das envoltórias de resistência. Ela também apresenta os valores da razão entre os ângulos de interface de cisalhamento direto e rampa ( $E\phi_{sg}$ ).

Tabela 2.6 – Parâmetros de resistência dos ensaios de cisalhamento direto e rampa (Adaptado de Izgin e Wasti, 1998)

| Interface               | Parâmetros de resistência                    |      |    |     | Ensaio de Cisalhamento Direto                  | $\Delta\phi_{sg}$ | $E\phi_{sg}$ |
|-------------------------|--|------|----|-----|--|-------------------|--------------|
|                         | Ensaio de Rampa                              |      |    |     |  |                   |              |
| Areia 1<br>GM lisa      | $\sigma_c$<br>(kPa)                          | 25   | 50 | 100 | $a = 2,8\text{kPa}$<br>$\phi_{sg} = 22^\circ$  | 5,5°              | 1,33         |
|                         | $\alpha$ (°)                                 | 17   | 17 | 17  |  |                   |              |
|                         | $a = 0\text{kPa}$ $\phi_{sg} = 16,5^\circ$   |      |    |     |  |                   |              |
| Areia 1<br>GM<br>rugosa | $\sigma_c$<br>(kPa)                          | 25   | 50 | 100 | $a = 5\text{kPa}$<br>$\phi_{sg} = 32^\circ$    | 8,0°              | 1,33         |
|                         | $\alpha$ (°)                                 | 26   | 24 | 24  |  |                   |              |
|                         | $a = 0,5\text{kPa}$ $\phi_{sg} = 24^\circ$   |      |    |     |  |                   |              |
| Areia 2<br>GM lisa      | $\sigma_c$<br>(kPa)                          | 25   | 50 | 100 | $a = 4,25\text{kPa}$<br>$\phi_{sg} = 31^\circ$ | 7,5°              | 1,32         |
|                         | $\alpha$ (°)                                 | 25   | 25 | 23  |  |                   |              |
|                         | $a = 0,5\text{kPa}$ $\phi_{sg} = 23,5^\circ$ |      |    |     |  |                   |              |
| Areia 2<br>GM<br>rugosa | $\sigma_c$<br>(kPa)                          | 25   | 50 | 100 | $a = 2,89\text{kPa}$<br>$\phi_{sg} = 37^\circ$ | 9,5°              | 1,35         |
|                         | $\alpha$ (°)                                 | 38,7 | 30 | 29  |  |                   |              |
|                         | $a = 0,5\text{kPa}$ $\phi_{sg} = 27,5^\circ$ |      |    |     |  |                   |              |

Segundo Izgin e Wasti (1998), as envoltórias dos ensaios de rampa são lineares e praticamente passam pela origem. Já as envoltórias dos ensaios de cisalhamento direto apresentam interceptos coesivos não desprezíveis e ângulos de atrito de interface maiores que os obtidos dos ensaios de rampa. A diferença entre os valores de  $\phi_{sg}$  situa-se entre 5,5 e 9,5°.

Além disto, observa-se na Tabela 2.6 que os maiores ângulos de atrito de interface correspondem às geomembranas com superfície rugosas, independentemente do tipo de ensaio.

Lima Jr. (2000) e Mello (2001) executaram uma série de ensaios de rampa envolvendo diversos geossintéticos (geotêxteis e geomembranas) em dois tipos de solos, areia e argila. Concluíram que as características da superfície do

geossintético condicionam o mecanismo de ruptura. Verificaram que o mecanismo de ruptura da interface é progressivo e depende da rigidez e da aderência das interfaces. Os maiores valores de ângulo de ruptura foram obtidos para o solo argiloso e geomembrana rugosa.

Mello (2001) também observou que o aumento da inclinação da rampa provoca um aumento do comprimento solicitado de geomembrana e que a distribuição das tensões não é uniforme.

Lopes (2001) realizou ensaios de rampa utilizando 2 tipos de areia e 7 tipos de geossintéticos. Os resultados obtidos corroboram as conclusões de Lima Jr. (2000) e Mello (2001). Efetivamente, a estrutura do geossintético é condicionante da resistência da interface. Materiais mais lisos (geomembranas) têm parâmetros de resistência inferiores aos de materiais mais rugosos (geotêxteis). Além disto, o aumento da tensão de confinamento reduz o ângulo de atrito de interface. A autora recomenda a execução de ensaios de rampa configurados com caixa superior e inferior, sobretudo para materiais como geogrelhas que apresentam grande área aberta e o atrito solo-solo é parcela importante da resistência total da interface.

Viana e Palmeira (2003) também empregaram ensaios de rampa para o estudo do reforço de solos de cobertura de taludes de resíduos. Os autores introduzem geogrelhas e geotêxteis em diferentes alturas da camada de solo e analisam a variação da resistência da interface solo-geomembrana solicitada pelo aumento progressivo da inclinação da rampa. Concluem que a inserção da geogrelha provoca uma diminuição dos esforços de tração na geomembrana e um aumento significativo do ângulo de rampa.

## 2.5 – 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 e 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 campo são geralmente onerosos e de difícil execução. Os ensaios de laboratório têm sido mais utilizados para a obtenção de parâmetros de resistência, destacando-se os ensaios de cisalhamento direto e o ensaios de arrancamento. Também são utilizados os ensaios de cisalhamento com o

reforço inclinado e o ensaio de rampa, sendo ambos uma derivação do ensaio de cisalhamento direto. A escolha do ensaio mais representativo vai depender da forma de interação entre a massa de solo e o geossintético.

O ensaio de cisalhamento direto é um ensaio bem conhecido e normatizado, que simula corretamente boa parte das solicitações que ocorrem em campo. Porém, alguns cuidados devem ser tomados quanto à sua utilização para obtenção de parâmetros de interface de geogrelha. Na utilização da base rígida, em substituição ao solo, deve-se selecionar um material que apresente uma rugosidade semelhante a do solo da caixa superior. Como a geogrelha apresenta uma área aberta de tamanho razoável, o atrito solo-solo é uma parcela significativa da resistência total da interface. Outro cuidado importante é adequar o tamanho da caixa ao tamanho das aberturas das amostras de geossintético e ao tamanho médio das partículas (Jewell e Wroth, 1987; Saez, 1997; Gourc et al., 1996). A interpretação do ensaio é simples e fornece os parâmetros de resistência a partir de uma envoltória construída com no mínimo três tensões de confinamento.

O ensaio de arrancamento é o ensaio que melhor representa situações de campo quando o movimento relativo geossintético/massa de solo é o arrancamento. Contrariamente ao ensaio de cisalhamento, este ensaio não é normatizado. Em função disto, diversos pesquisadores desenvolveram equipamentos que diferenciam-se em tamanho, sistema de confinamento, velocidade de arrancamento, entre outras características, que podem conduzir a diferentes valores de parâmetros de interface. A forma de obtenção de parâmetros de interface é análoga ao do cisalhamento direto.

O ensaio de rampa foi desenvolvido para suprir as limitações do ensaio de cisalhamento e arrancamento na avaliação de sistemas de cobertura de taludes e sistemas de impermeabilização. Nos últimos anos, tem sido observada uma maior utilização do ensaio de rampa. Sua normalização data de 1996. O ensaio tem execução e interpretação simples e os parâmetros de resistência da interface são obtidos de maneira análoga ao ensaio de cisalhamento.

A literatura indica que os parâmetros de resistência de interfaces solo-geossintético obtidos através dos 3 tipos de ensaios são diferentes. Vários fatores podem ser os responsáveis por estas diferenças, destacando-se o tipo de solicitação da interface imposto por cada um dos ensaios. O tamanho e densidade da amostra, nível de tensão e a velocidade de carregamento também são fatores de influência na

resistência da interface. Desta forma, procurou-se desenvolver um equipamento simples, porém versátil, capaz de executar ensaios de rampa, de cisalhamento e de arrancamento utilizando uma mesma estrutura para amostras de  $1\text{m}^2$  de área, confinadas por um mesmo sistema.

Este trabalho apresenta, portanto, o desenvolvimento do protótipo deste equipamento, habilitado especificadamente para a execução de ensaios de rampa de interfaces solo-geossintético.

## CAPÍTULO III

### 3. EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE RAMPA

#### 3.1 – INTRODUÇÃO

Os ensaios normalmente utilizados no estudo da interação solo-geossintético são os ensaios de cisalhamento direto 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.

Se o geossintético permanecer solidário com parte do solo envolvente e a resistência for mobilizada pelo deslizamento da massa restante, o ensaio mais adequado é o de cisalhamento direto (Figura 3.1a). Porém, se o 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 3.1b).

Entretanto, para uma série de situações de obra como sistemas de proteção contra erosão e sistemas de impermeabilização de taludes, nem o ensaio de cisalhamento direto nem o ensaio de arrancamento são os mais representativos. Nestas situações, a mobilização de resistência ocorre em um plano inclinado, em geral, sob tensões reduzidas. A situação de arrancamento não se aplica, tampouco o ensaio de cisalhamento direto, cuja distribuição das tensões normais é uniforme, contrariando a distribuição trapezoidal do plano inclinado (Palmeira et al. 2002). Além disto, ensaios de cisalhamento direto executados sob nível reduzido de tensões de confinamento podem conduzir a erros consideráveis (Girard et al., 1990; Izgin e Wasti, 1998; Wasti e Özdüzgün, 2001). Para evitar estas condições, equipamentos de plano inclinado (Figura 3.1c) estão sendo desenvolvidos para o estudo da interação entre solo e geossintéticos.

Os ensaios executados no equipamento de plano inclinado também são conhecidos por ensaio de corte em plano inclinado, ensaio de plano inclinado ou ensaio de rampa, denominação adotada neste trabalho.

Cada um dos ensaios, arrancamento, cisalhamento direto e rampa, representa um tipo de movimento relativo entre solo e o geossintético, que por sua

vez representa uma solicitação diferente em campo. Sendo assim, procurou-se desenvolver um equipamento capaz de realizar em uma mesma estrutura com poucas alterações, os três tipos de ensaios. Este trabalho apresenta somente o desenvolvimento de um equipamento básico com as três funções. Porém, enfoca, como objetivo principal, o desenvolvimento dos acessórios do ensaio de rampa, além da calibração das metodologias de preparação das amostras e de execução do ensaio.

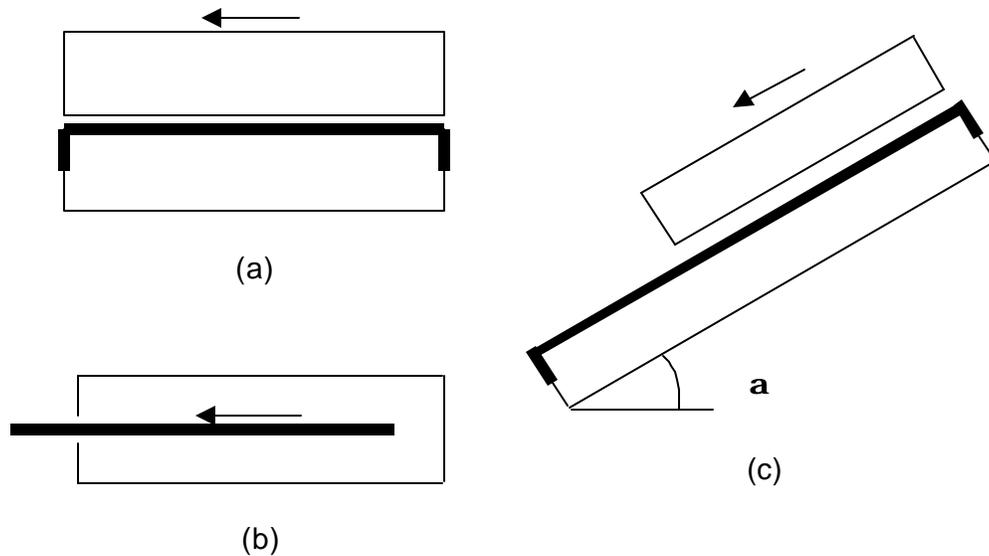


Figura 3.1 – Ensaios típicos das interfaces solo-geossintético: (a) Cisalhamento Direto, (b) Arrancamento e (c) Rampa.

### 3.2 – REFERÊNCIA NORMATIVA

Este equipamento foi projetado com a finalidade de realizar os três ensaios usuais para estudo de interfaces, utilizando uma única estrutura básica. Além disto, considerou-se prioritária, a execução de ensaios de rampa de grande escala, em amostras de  $1\text{m}^2$ .

O projeto do equipamento considerou algumas recomendações da literatura, sobretudo a norma europeia EN ISO 12957-2 e Lopes (2001).

Alguns aspectos importantes para o projeto do equipamento de ensaio de rampa podem ser resumidas:

- (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, podendo esta última dimensão variar até 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, podendo esta última dimensão variar até 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.

Estes aspectos, associados à recomendações de Izgin (1997), Lima Jr. (2000), Mello et al. (2003), entre outros, foram considerados para o desenvolvimento do equipamento de rampa deste trabalho.

### 3.3 – EQUIPAMENTO

O equipamento é constituído pelas seguintes partes:

- (i) sistema de reação e basculamento;
- (ii) caixas de ensaio;
- (iii) instrumentação e
- (iv) sistema de aplicação de sobrecargas.

As Figuras 3.2 a 3.5 apresentam esquematicamente o equipamento desenvolvido. A estrutura é composta por uma série de perfis de aço soldados, formando um sistema único, dimensionado de forma a resistir aos esforços solicitantes. A base é constituída por perfis I de 15,24cm, com dimensões iguais a

2,50m de comprimento e 1,35m de largura (Figuras 3.2 a 3.4). O pórtico também foi construído com perfis de 15,24cm e tem altura de 2,53m e a mesma largura da base (Figuras 3.2 e 3.3). Para facilitar a movimentação do equipamento, o pórtico é constituído por duas partes unidas por parafusos (Figura 3.5b). Nesta estrutura é fixada a talha responsável pela inclinação da rampa.

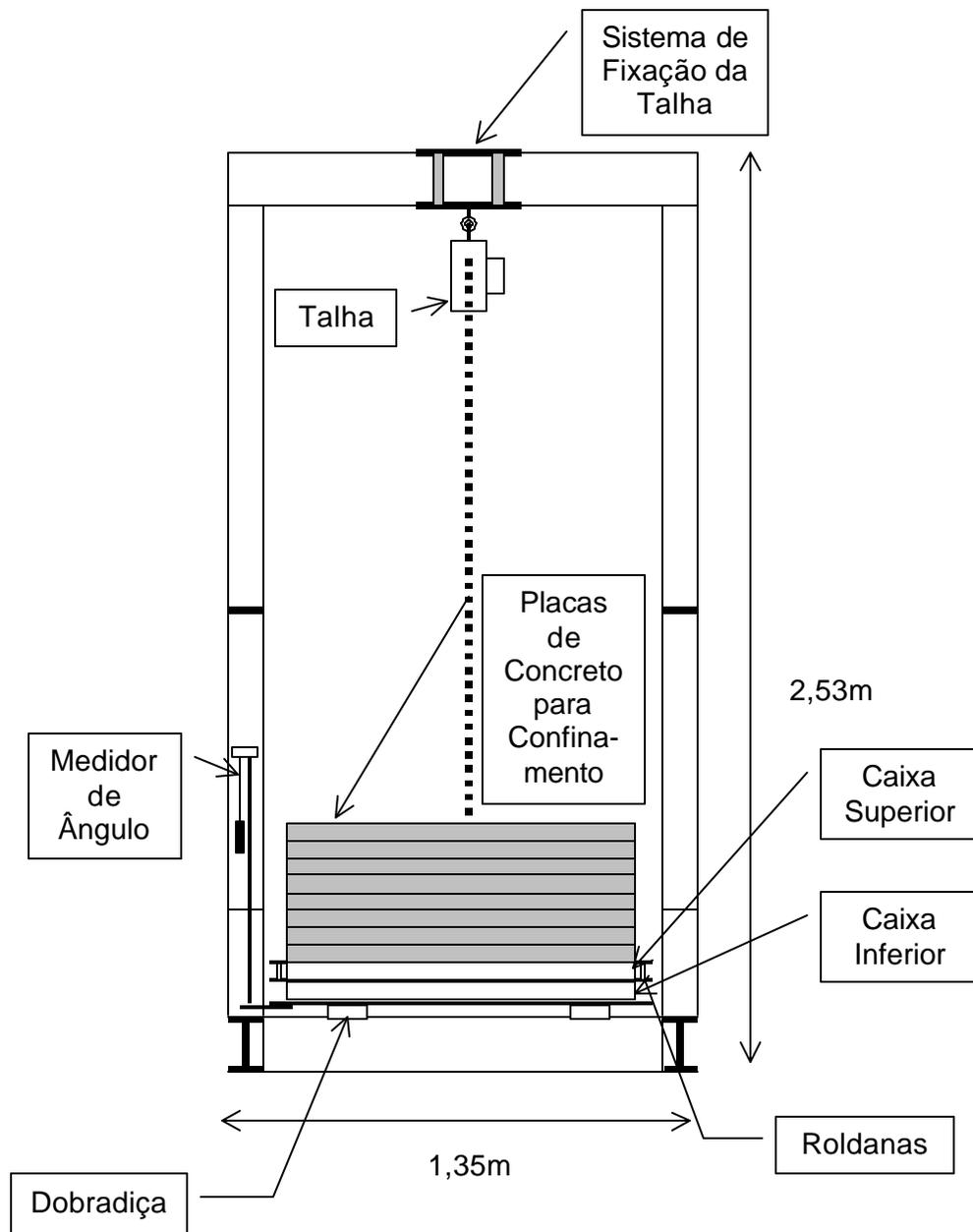


Figura 3.2 – Vista frontal do equipamento.

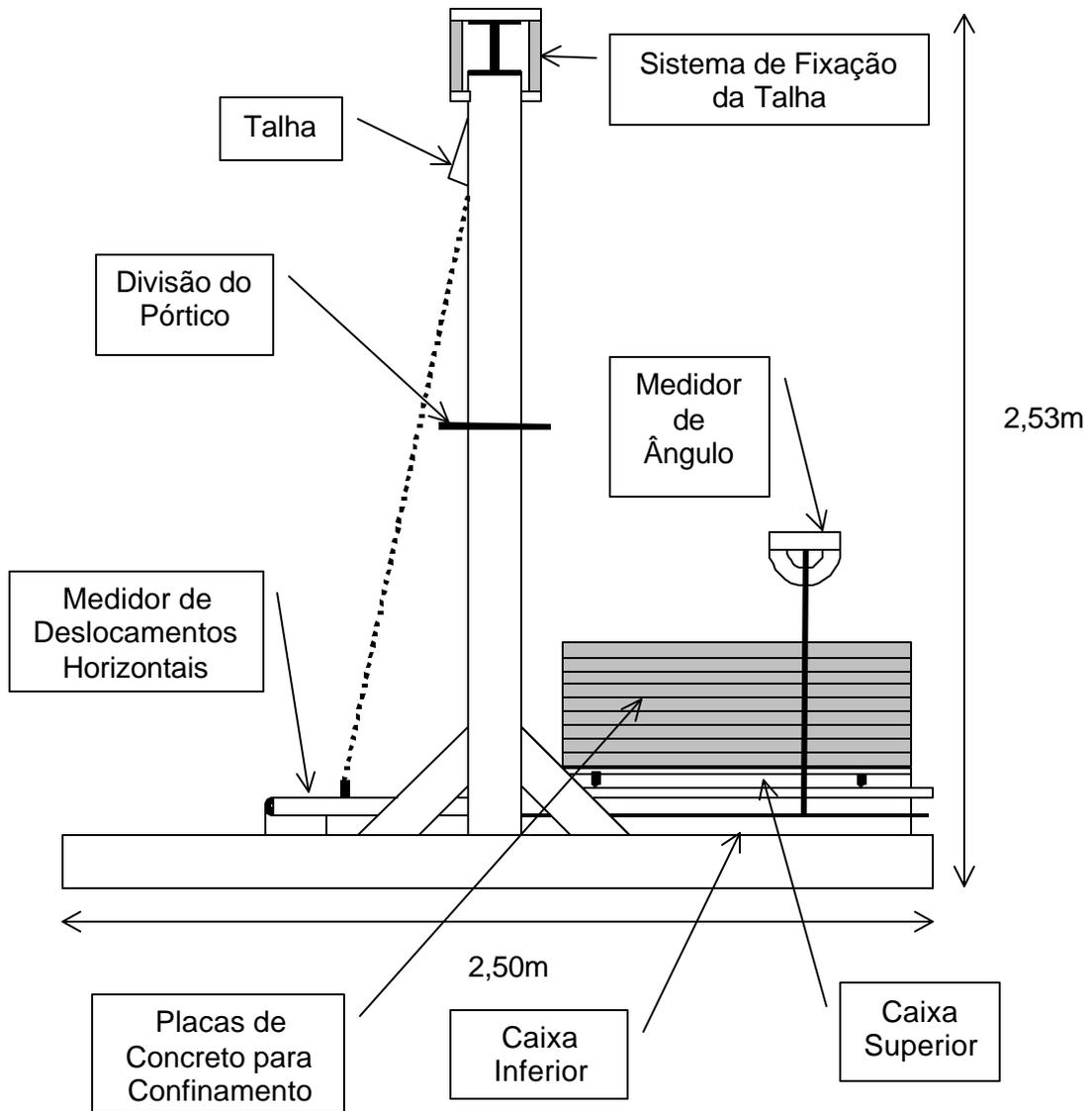


Figura 3.3 – Vista lateral do equipamento.

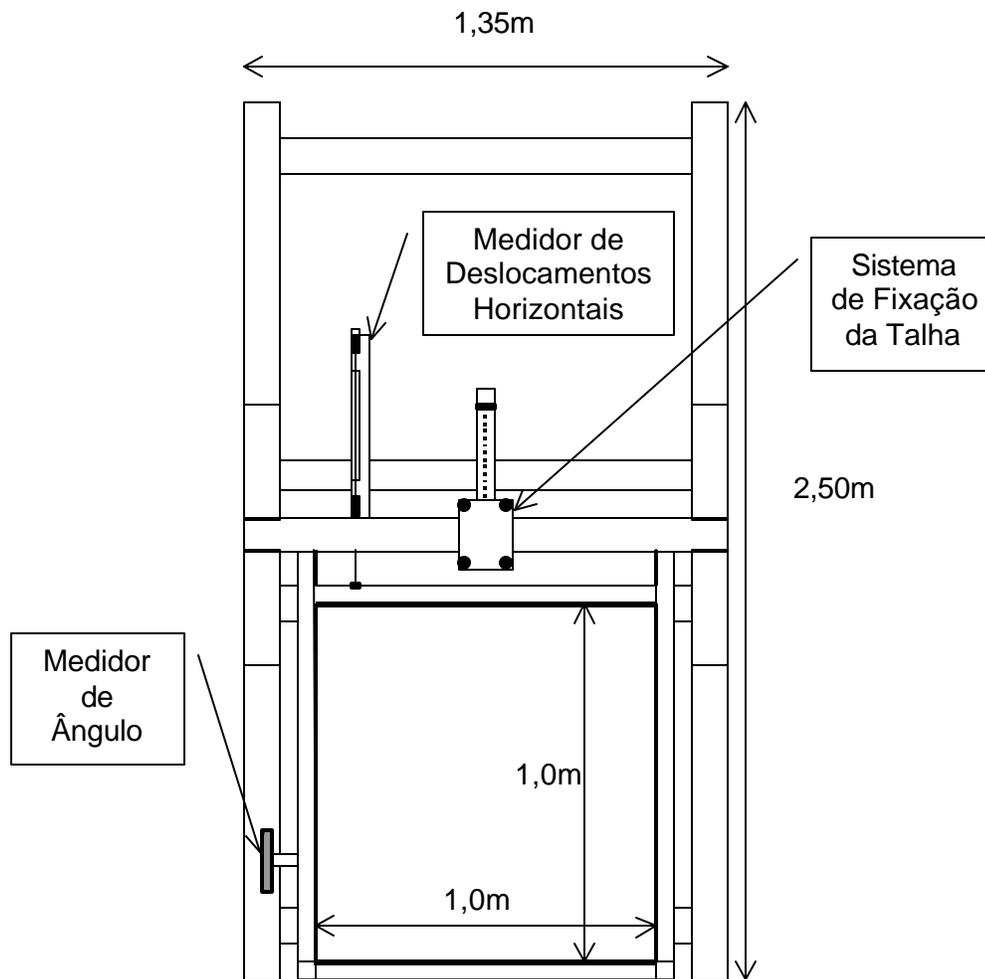


Figura 3.4 – Vista superior do equipamento.

### 3.3.1 – Sistema de Basculamento

A rampa de ensaio 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 (5,08cm x 2,54cm x 0,64cm) 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. Ela é ligada à estrutura através de duas dobradiças (Figura 3.6) compostas de três tubos de 3,81cm de diâmetro externo, através dos quais passa-se um pino de 2,54cm de diâmetro. Sua porção central (em vermelho) é fixada na estrutura e as duas partes menores são fixadas nos perfis U que enrijecem a rampa.



(a)



(b)

Figura 3.5 – Equipamento de ensaio de rampa: (a) Vista geral com rampa inclinada, (b) Detalhe da ligação das partes do pórtico.



Figura 3.6 – Detalhe da dobradiça de ligação da rampa à estrutura.

O mecanismo de basculamento é composto por uma talha, fixada no centro do pórtico (Figura 3.7a). A corrente da talha é ancorada na base da rampa, sobre um dos perfis U que enrijece a base e que se prolonga por 70cm na parte inferior (Figura 3.7b). A capacidade máxima de içamento da talha é de 10kN.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Sistema de basculamento: (a) Fixação da talha no topo do pórtico, (b) Ancoragem da corrente na base da rampa.

### 3.3.2 – Caixas de Ensaio

A norma europeia ISO 12957-2 faculta o uso de uma ou duas caixas de ensaio. Um equipamento capaz de utilizar as duas opções oferece a vantagem de se avaliar a influência da rigidez da base de apoio do geossintético no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001). No caso desta pesquisa, optou-se por utilizar duas caixas de ensaio, aproveitadas tanto para o ensaio de rampa quanto para o ensaio de cisalhamento direto. É interessante informar que pequenas alterações permitem o uso de uma única caixa.

As caixas superior e inferior apresentam dimensões internas de 1m de largura por 1m de comprimento e 1m de largura por 1,2m de comprimento, respectivamente. O uso de uma caixa inferior maior se justifica pelo fato de se manter sempre uma área de contato de 1m<sup>2</sup> em qualquer momento do ensaio. Além disto, evita-se perdas de material, principalmente solos arenosos, com o movimento da caixa. A diferença de 20cm entre as caixas corresponde ao deslocamento máximo permitido pelo sistema (Figura 3.8). Ambas as caixas têm altura de 5cm.

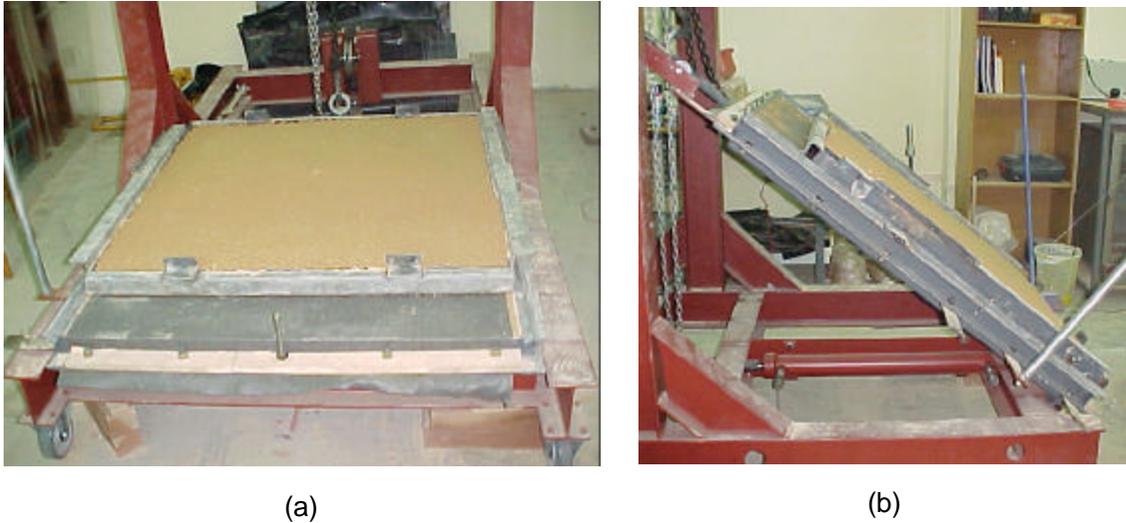


Figura 3.8 – Ensaio da interface solo-geotêxtil: (a) Posição inicial e (b) Posição final.

A caixa superior movimentada-se sobre roldanas que correm sobre cantoneiras com aba de 2cm que funcionam como trilhos (Figura 3.9). 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. Ensaio de calibração realizados com este dispositivo mostraram que a caixa superior entra em movimento para inclinações inferiores a  $0,5^\circ$ . Outra característica a ser ressaltada é o espaçamento de 3mm entre caixas. Isto em princípio, pode ser uma restrição relativa à espessura dos geossintéticos ensaiados. Porém, pode ser facilmente contornada empilhando-se mais cantoneiras sobre a já existente.

### 3.3.3 – Instrumentação

A norma europeia ISO 12957-2 prevê, como instrumentação básica do equipamento, um medidor de ângulo (inclinação) e um medidor de deslocamento da caixa superior. No protótipo desenvolvido neste trabalho, utilizou-se equipamentos de leitura mecânicos bastante simples.

Os ângulos de rampa foram monitorados por um transferidor de grande diâmetro preso em uma cantoneira (Figura 3.10). No centro deste transferidor fixou-



Figura 3.9 – Detalhe da roldana da caixa superior sobre o trilho da caixa inferior.

se um parafuso e pendurou-se um peso de 100g através de uma linha metálica de pesca. As leituras são realizadas com resolução de  $1^\circ$ . Este medidor é fixado na lateral da rampa próximo ao seu centro, nos mesmos parafusos que prendem as caixas de ensaio. Para aumentar sua estabilidade prendeu-se as extremidades do medidor com linhas de pesca metálicas, em dois novos pontos na rampa. Utilizou-se também um medidor de ângulo mecânico com base magnética com resolução de  $0,5^\circ$  (Figura 3.11).



(a)



(b)

Figura 3.10 – Medidor de ângulo de rampa: (a) Vista geral e (b) Detalhe.

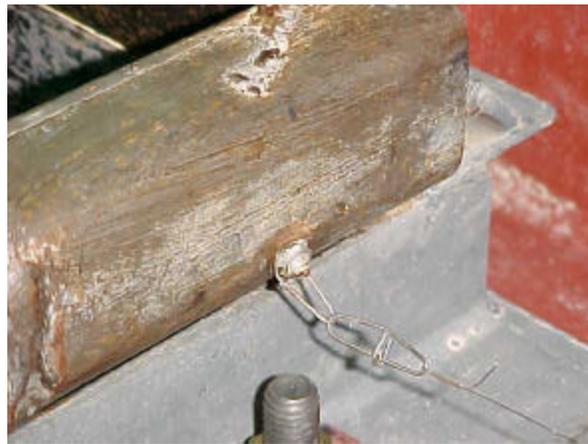


Figura 3.11 – Medidor de ângulo de rampa de base magnética.

Os deslocamentos da caixa superior foram monitorados por um dispositivo do tipo *tell tale*. Este instrumento, muito simples e eficiente, é composto por uma linha metálica com uma de suas extremidades presa na caixa superior. Na outra extremidade é pendurado um peso de chumbo de 100g. A linha metálica é suportada por duas roldanas fixadas às extremidades de uma cantoneira de 50cm, sobre a qual é ajustada uma régua metálica de 30cm (Figura 3.12). Na linha, é fixado um pequeno amassador dobrado, usado como referência para fazer as leituras. A precisão do *tell tale* é de 0,5mm.



(a)



(b)

Figura 3.12 – Medidor de deslocamento da caixa superior do tipo *tell tale*: (a) Vista superior; (b) Detalhe da fixação na caixa superior.

### 3.3.4 – Sistema de Confinamento

O sistema de confinamento da amostra na caixa superior é composto por placas de concreto de 1m de comprimento, 1m de largura e 5cm de altura, exatamente as dimensões internas da caixa superior. Elas pesam em média 125kg, o que confere 1,2kPa de tensão de confinamento (Figura 3.5a).

Nesta pesquisa, adotou-se tensões de confinamento iguais a 1kPa, correspondendo aos 5cm de solo compactado da caixa superior, 4,6kPa

correspondentes aos 5cm de solo compactado mais 3 placas de concreto e 8,2kPa correspondentes aos 5cm solo compactado mais 6 placas de concreto.

Este sistema demonstrou ser eficiente, porém apresenta algumas restrições operacionais. Conforme apresentado no Capítulo 2, a distribuição das tensões normais ao longo da superfície de contato solo-geossintético não é uniforme (Figura 3.13). Numa situação limite, ocorre a perda de confinamento na extremidade traseira da caixa superior, devido à tendência de tombamento das placas de concreto.

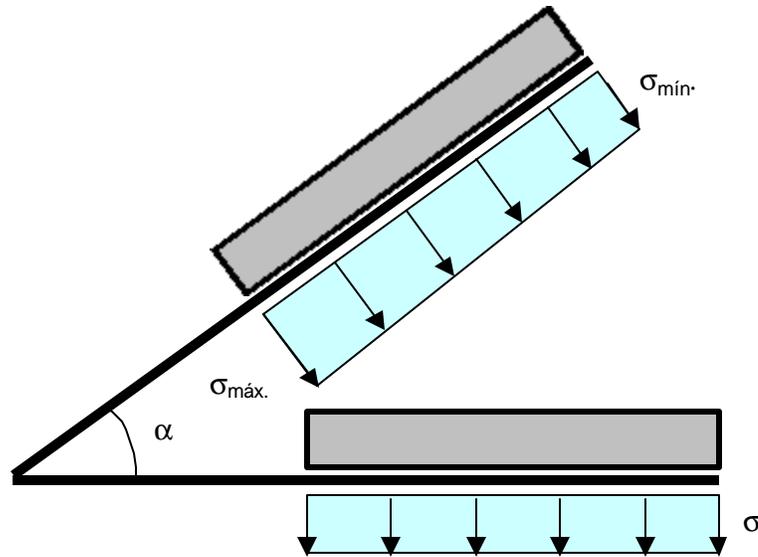


Figura 3.13 – Distribuição das tensões de confinamento com a inclinação da rampa.

Este problema foi responsável pela perda de alguns ensaios de interfaces mais resistentes sob altas tensões confinantes.

Desta forma, procedeu-se à análise para determinação do limite de inclinação da rampa sem a ocorrência de tombamento.

A tensão de confinamento sobre uma determinada área (Figura 3.14) pode ser expressa por:

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{\frac{b \times h^2}{6}} \quad (3.1)$$

$$M = P \times x \quad (3.2)$$

$$A = b \times h \quad (3.3)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão de confinamento;

P = peso aplicado;

A = área;

M = momento;

x = braço de alavanca;

b e h = arestas da base.

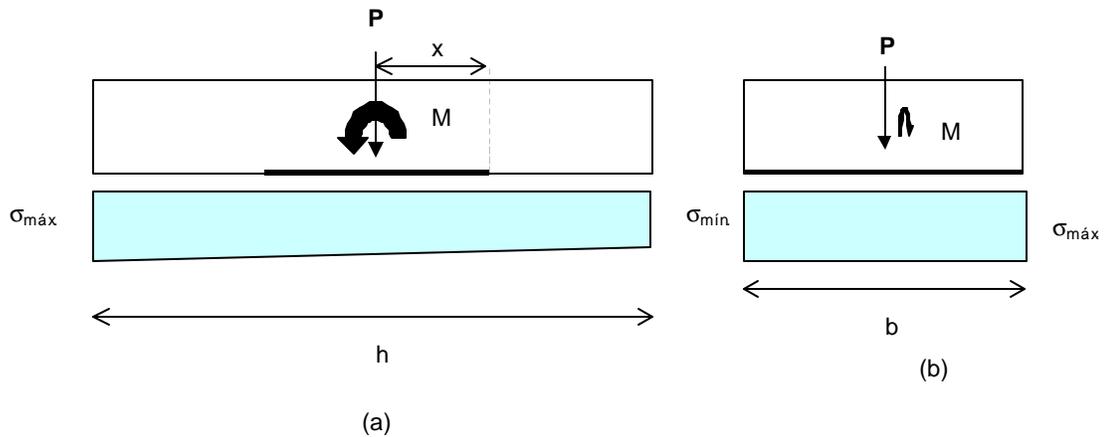


Figura 3.14 – Esquema de distribuição da tensão de confinamento: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal.

A situação limite ocorre para uma tensão nula em uma das extremidades do conjunto formado pela caixa superior e placas de concreto. Desta forma, igualando-se a Equação 3.1 a zero, obtêm-se x igual a 1/6 da aresta. Portanto, para não ocorrer 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 3.15 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 concreto não coincidir com a projeção do terço médio do conjunto, afastado de uma distancia ( $X_2$ ) da extremidade da rampa, ocorre o travamento da caixa superior, devido à tendência ao tombamento da extremidade do conjunto.

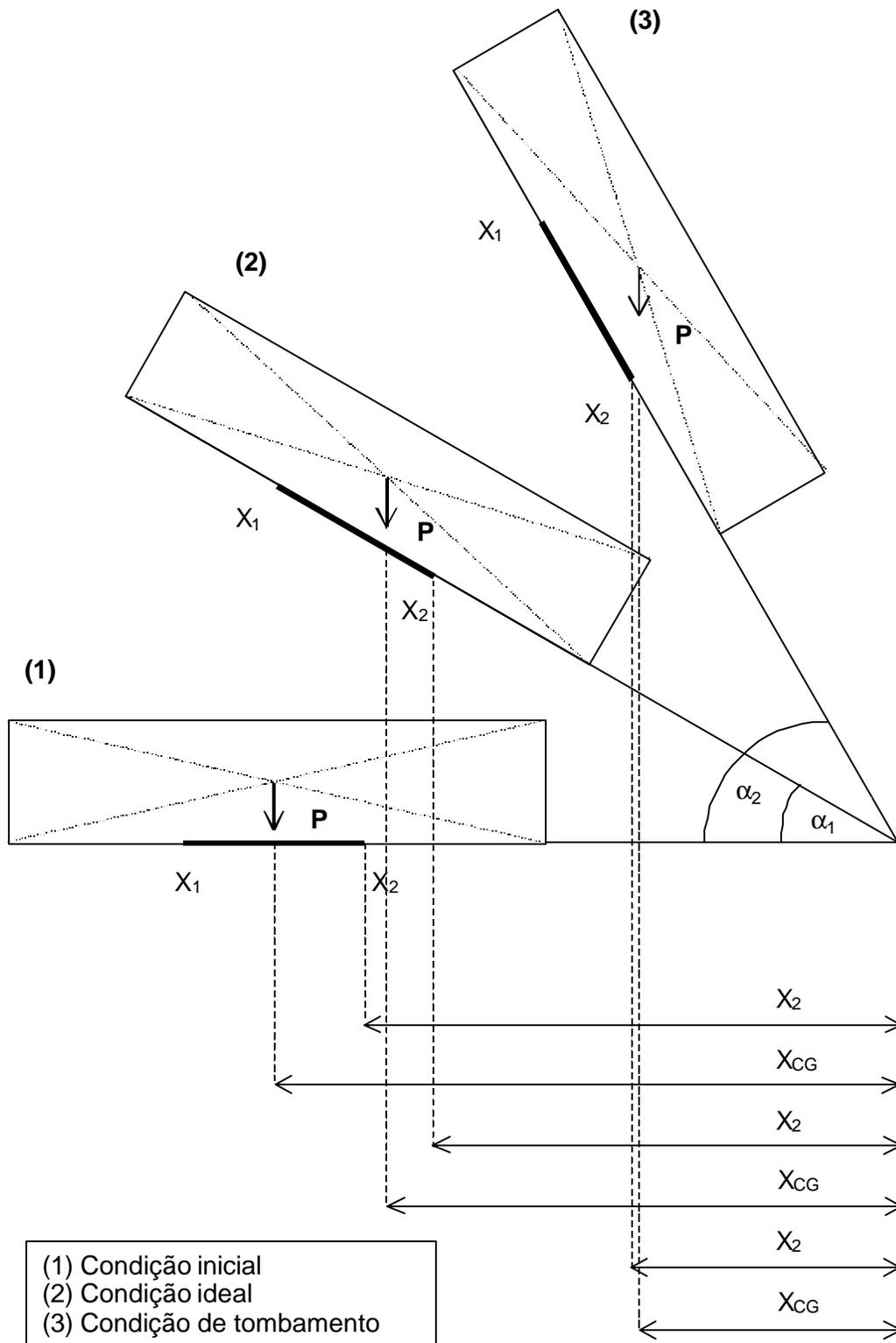


Figura 3.15 – Condição de tombamento do sistema de confinamento com a inclinação da rampa.

Considerando a Figura 3.15 e as Equações 3.1 a 3.3, foi realizada uma análise do tombamento, variando-se os parâmetros  $X_2$  e  $X_{CG}$  em função do ângulo de inclinação. A Figura 3.16 apresenta os resultados desta análise para  $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ . O limite para a não ocorrência do tombamento corresponde ao valor do ângulo onde as curvas se interceptam.

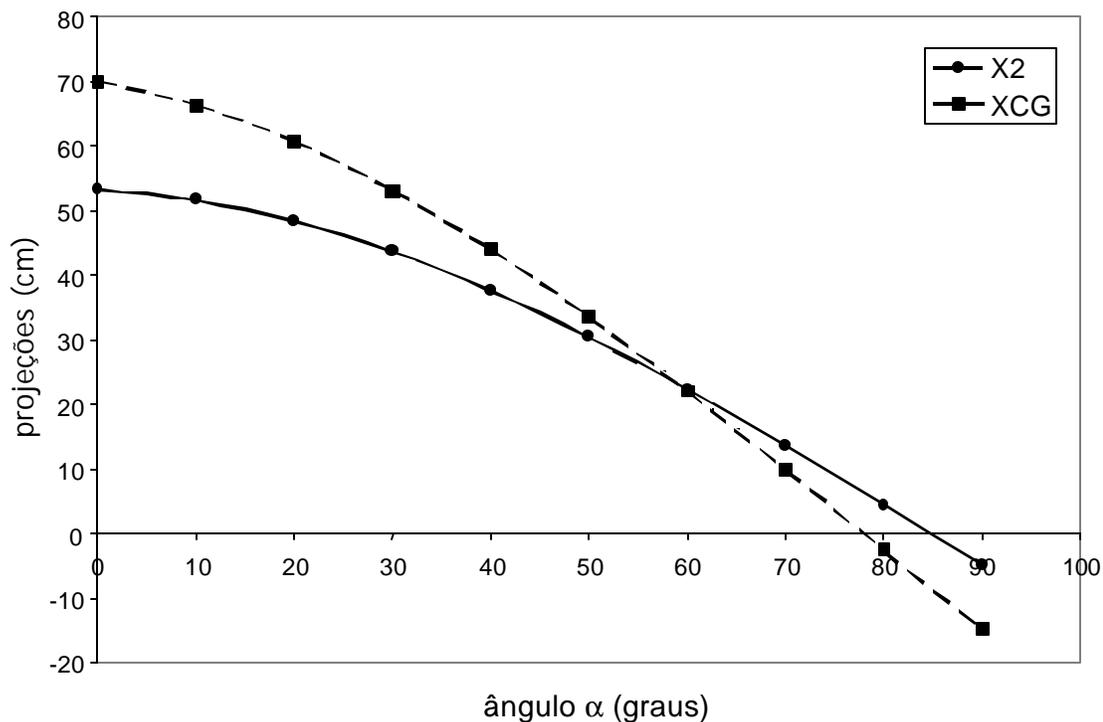


Figura 3.16 – Análise do tombamento para a tensão de confinamento de 4,6kPa.

A Tabela 3.1 apresenta os resultados da análise de tombamento para as condições possíveis de confinamento. O valor do ângulo crítico ( $\alpha_{crit}$ ) representa a inclinação crítica da rampa onde há tombamento.

Tabela 3.1 – Limites críticos para tombamento do sistema de confinamento

| Condição     | $\alpha_{crit}$ | Condição     | $\alpha_{crit}$ | Condição     | $\alpha_{crit}$ |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| solo         | 81,6°           | solo+3placas | 59,5°           | solo+6placas | 44,1°           |
| solo+1placa  | 73,4°           | solo+4placas | 53,2°           | solo+7placas | 40,0°           |
| solo+2placas | 65,6°           | solo+5placas | 48,3°           | solo+8placas | 36,5°           |

Os valores fornecidos pela análise limitam os valores de tensão de confinamento para os ensaios de rampa. O limite é definido pela resistência ao atrito da interface ensaiada.

### 3.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relevância do estudo de interfaces solo-geossintéticos é inquestionável. Os ensaios mais utilizados para o estudo da interação solo geossintético são: cisalhamento direto, arrancamento e rampa. A escolha do ensaio mais adequado depende sobretudo do tipo de geossintético e do movimento relativo entre ele e a massa de solo. Um equipamento capaz de executar em uma mesma estrutura os três ensaios de interface oferece vantagens. Desta forma, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um equipamento capacitado a executar ensaios de arrancamento, cisalhamento direto e rampa, utilizando-se a mesma estrutura com pequenas alterações intrínsecas a cada tipo de ensaio.

O projeto deste equipamento foi elaborado considerando-se uma série de recomendações encontradas da literatura, principalmente a norma europeia ISO 12957-2.

O equipamento é constituído de uma estrutura de suporte, sistema de carregamento, caixas de ensaio e instrumentação. Este trabalho deu prioridade ao ensaio de rampa, e, portanto, à construção dos seus componentes básicos, como sistema de basculamento e caixas de ensaio.

Desta forma, o capítulo apresentou o projeto básico do equipamento de ensaio e os detalhes dos componentes correspondentes ao ensaio de rampa. Apresentou também análises para a definição dos limites de operação do equipamento para a execução dos ensaios de rampa.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE RAMPA

#### 4.1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais empregados neste estudo, o método de preparação dos corpos de prova, a metodologia utilizada para execução dos ensaios de rampa, os resultados dos ensaios, bem como suas respectivas análises e as considerações finais.

#### 4.2 – 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.

##### 4.2.1 – Solo

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 curva granulométrica sem e com utilização de defloculante apresentada na Figura 4.1.

A Tabela 4.1 apresenta as principais características físicas do solo estudado, assim como as respectivas normas utilizadas nos ensaios de caracterização.

Tabela 4.1 – Características físicas do solo silto-argiloso

| <b>Características</b>                        | <b>Valor</b>          | <b>Norma</b> |
|---|-----------------------|--------------|
| 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 ( $\gamma_s$ ) | 28,0kN/m <sup>3</sup> | NBR 6508     |
| Peso Específico Seco Máximo ( $\gamma_d$ )    | 13,6kN/m <sup>3</sup> | NBR 7182     |
| Teor de Umidade Ótimo ( $\omega_{bi}$ )       | 31,1%                 | NBR 7182     |
| Coefficiente de Uniformidade ( $C_u$ )        | 3,7                   | NBR 7181     |

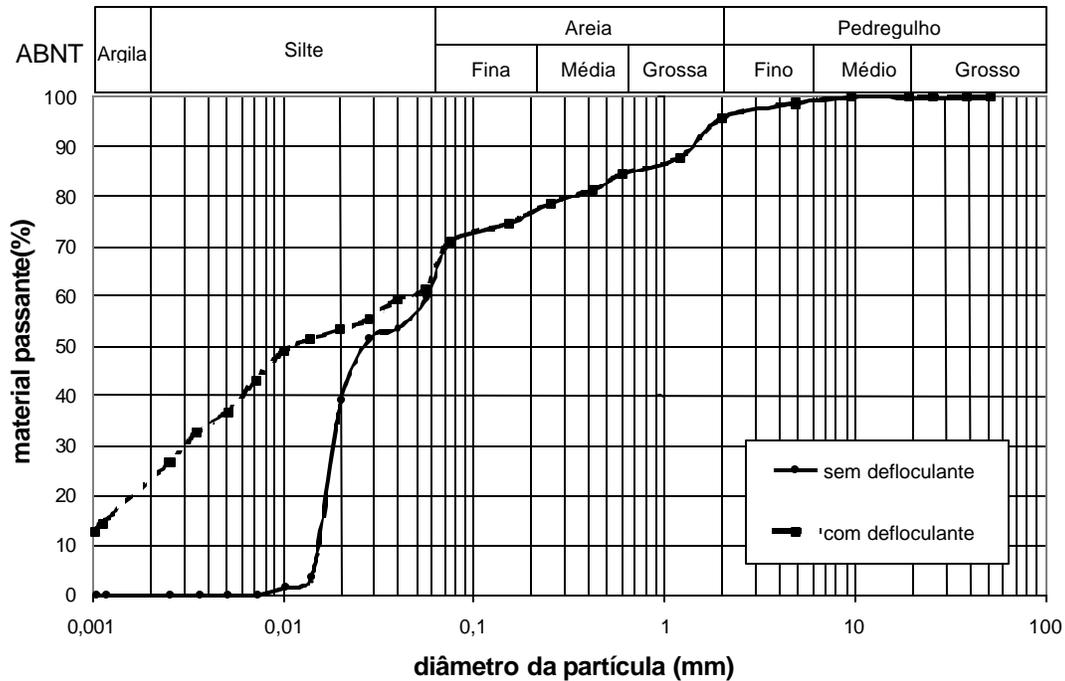


Figura 4.1 – Curva granulométrica do solo silto-argiloso.

Na Figura 4.2 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  $43,8^\circ$  de ângulo de atrito e 12,3kPa de coesão.

#### 4.2.2 – Geossintéticos

O geotêxtil utilizado no programa experimental corresponde ao Geofort G300 (Figura 4.3a). É um geotêxtil não tecido agulhado de filamentos de polipropileno, fabricado pela Ober S.A. Indústria e Comércio. A Tabela 4.2 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

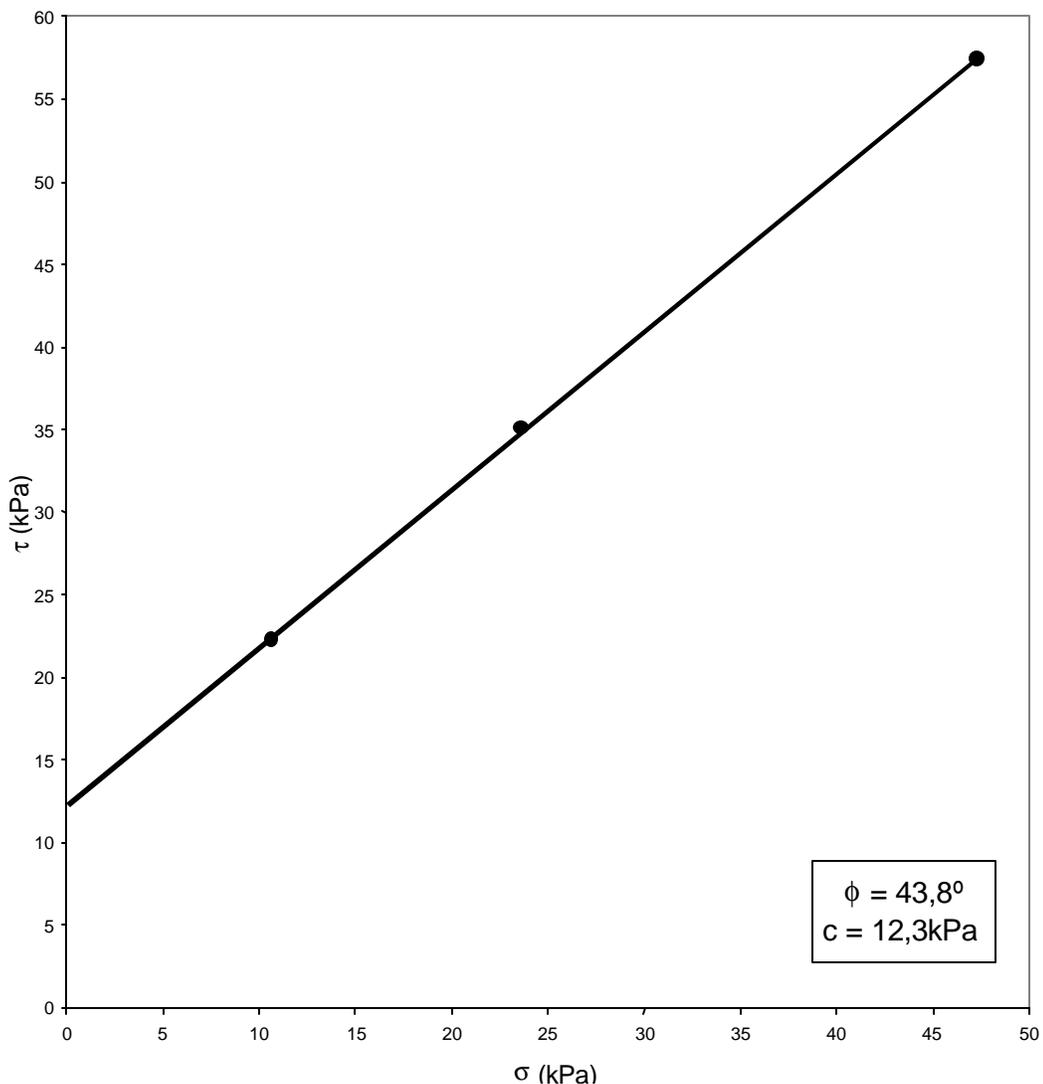


Figura 4.2 – Envoltória de resistência obtida dos ensaios de cisalhamento direto (Becker, 2003).

A geogrelha utilizada foi a Fortrac 55/25-20/30 (Figura 4.3b), constituída de poliéster de alta tenacidade revestida com PVC, fabricada pela Huesker. A Tabela 4.3 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

A geomembrana utilizada foi a CipaGeo (Figura 4.3c), de PVC, texturizada em uma das faces, fabricada pela Cipatex. A Tabela 4.4 apresenta as principais características do material segundo o catálogo do fabricante.

Tabela 4.2 – Características do geotêxtil Geofort G300 (Ober, 1999)

| Característica                           | Valor               | Norma         |
|--|---------------------|---------------|
| Gramatura                                | 300g/m <sup>2</sup> | 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 <sup>-1</sup> | 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 4.3 – Características da geogrelha Fortrac 55/25-20/30 (Huesker, 2002)

| Característica                        | Valor        | Norma     |
|---------------------------------------|--------------|-----------|
| Abertura                              | 20mm x 30mm  |           |
| Resistência à Tração                  | Longitudinal | 55 kN/m   |
|                                       | Transversal  | 25 kN/m   |
| Alongamento na Ruptura (Longitudinal) | 5%           | NBR 12824 |

Tabela 4.4 - Características da geomembrana CipaGeo (Cipatex, 2003)

| Característica         | Valor                 | Norma       |
|------------------------|-----------------------|-------------|
| Densidade              | 1200kg/m <sup>3</sup> | ASTM D 792A |
| Gramatura              | 960g/m <sup>2</sup>   | 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   |

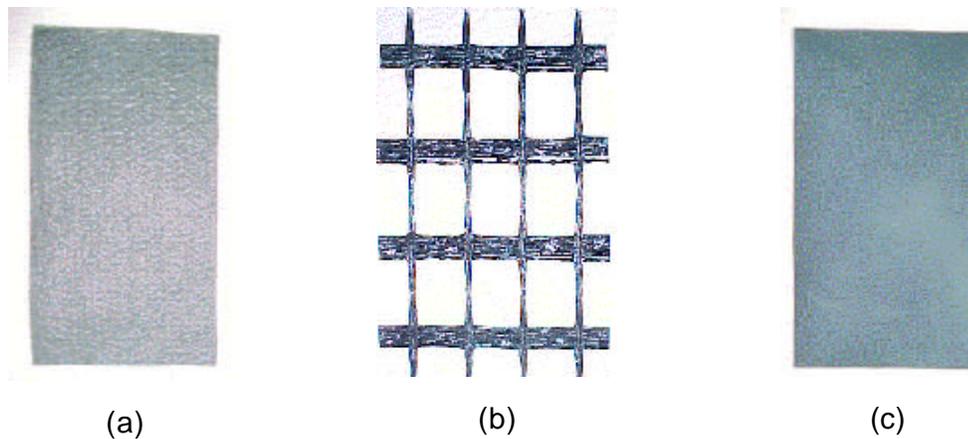


Figura 4.3 – Geossintéticos ensaiados: (a) Geotêxtil, (b) Geogrelha e (c) Geomembrana.

#### 4.3 – METODOLOGIA DO ENSAIO DE RAMPA

Este item apresenta as metodologias utilizadas para preparação dos corpos de prova, execução dos ensaios e avaliação dos resultados.

##### 4.3.1 – 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 10 cm das extremidades. A estocagem deve ser em local adequado, sem exposição à luz, umidade e poeira. No caso desta pesquisa, todas as amostras foram confeccionadas com dimensões de 1,5m de comprimento por 1m de largura.

O controle de compactação do solo foi efetuado através da altura média de camada compactada. A caixa inferior de ensaio apresenta comprimento de 1,2m por 1,0m de largura. A caixa superior apresenta 1,0m de comprimento por 1,0m de largura. Ambas as caixas têm 5,0cm de altura. Com estas dimensões, calculou-se o volume de solo necessário para obtenção do peso específico desejado. Os corpos de prova de solo foram compactados em duas camadas com altura de 2,5cm para cada caixa.

A seqüência construtiva do corpo de prova iniciava-se pela compactação das duas camadas de solo da caixa inferior, regularizando-se a superfície. No caso dos ensaios das interfaces solo-geossintéticos, esta era a superfície de instalação e

ancoragem do geossintético. Este era fixado na base da rampa através dos parafusos da caixa inferior (Figura 4.4). Sobre esta região da amostra era ajustada uma placa de compensado perfurada. O conjunto geossintético-placa era então aparafusado na estrutura.



Figura 4.4 – Instalação da amostra de geogrelha na preparação do ensaio de rampa.

A seguir, instalava-se a caixa superior de ensaio e o medidor de deslocamentos da caixa. Antes de se compactar as duas camadas restantes de solo, colocava-se uma geomembrana de PEAD na superfície do solo e/ou do geossintético, para a preservação da superfície de deslizamento no ensaio de rampa. Tiras de geomembrana de PEAD também eram ajustadas nas laterais internas da caixa para minimizar o atrito entre as paredes laterais e o solo.

Seguia-se, então, ao lançamento e à compactação das camadas de solo da caixa superior de ensaio (Figura 4.5).

Por fim, removia-se a geomembrana de PEAD da interface. O peso da metade superior do corpo de prova de solo promovia o assentamento e o contato com a metade inferior. Por segurança, compactava-se novamente com um peso de madeira, a fim de garantir o contato dos solos das duas caixas. Para tensões de confinamento maiores que a da camada de solo, utilizava-se placas de concreto com as mesmas dimensões internas da caixa superior. Cada placa tinha 120kgf, o que correspondia a uma tensão confinante vertical de cerca de 1,2kPa.

### 4.3.2 – Procedimento do Ensaio de Rampa

O procedimento do ensaio de rampa é muito simples e consiste em acionar a talha de forma a inclinar gradualmente o conjunto até que a caixa superior deslize (Figura 4.6).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5 – Preparação da amostra de solo na caixa superior: (a) Lançamento, (b) Compactação e (c) Controle de altura.



Figura 4.6 – Conclusão do ensaio de rampa de interface solo-geotêxtil.

A instrumentação utilizada para monitoramento do ensaio é composta por um medidor de ângulo e um medidor de deslocamento horizontal, instalado na caixa superior.

Durante o transcurso do ensaio, aplicava-se incrementos de 1° no plano de inclinação da rampa e monitorava-se o deslocamento da caixa superior em relação à inferior até ocorrer a ruptura da interface. Os resultados são apresentados na forma de gráficos ângulo de inclinação  $\alpha$  da rampa por deslocamento  $\Delta l$  da caixa (Figura 4.7). Considera-se como ângulo de ruptura aquele imediatamente anterior ao instante de escorregamento completo da caixa superior.

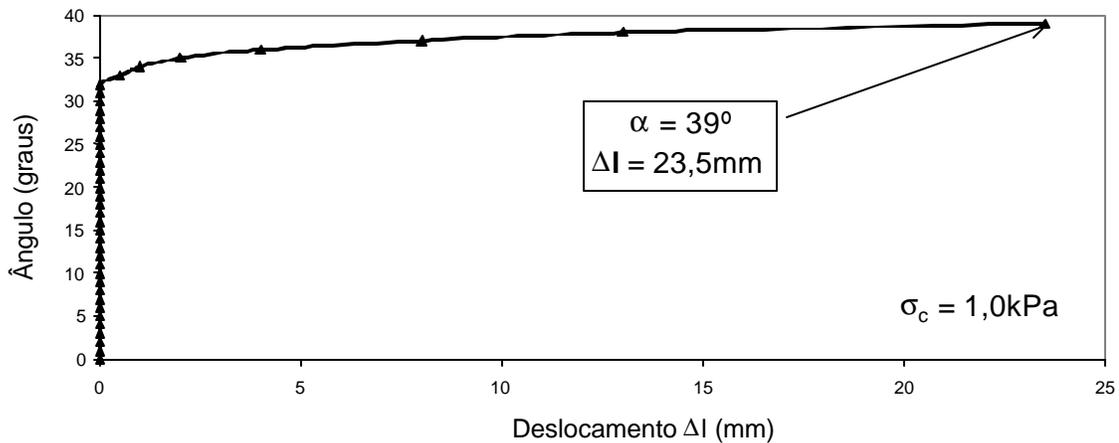


Figura 4.7 – Resultado típico de ensaio de rampa na interface solo-geotêxtil.

#### 4.3.3 – Metodologia de Análise de Resultados

A equação que define o mecanismo de interação solo-geossintético é definida por:

$$\tau = a + \sigma \times \tan \phi_{sg} \quad (4.1)$$

Onde:

$\tau$  = tensão cisalhante na interface;

$a$  = adesão solo-geossintético;

$\sigma$  = tensão normal na interface;

$\phi_{sg}$  = ângulo de atrito da interface solo-geossintético.

Desta forma, para se obter os parâmetros de interface ( $a$  e  $\phi_{sg}$ ), basta construir a envoltória de resistência a partir de uma série de ensaios com diferentes tensões de confinamento.

A metodologia utilizada para avaliar o ensaio de rampa é similar à reportada na bibliografia (Izgin, 1997; Lima Jr, 2001; Mello et al., 2003), fazendo-se a correção para incorporar a componente do peso da caixa superior na tensão de cisalhamento (Lopes, 2001 e Briançon, 2003).

As tensões atuantes no ensaio de rampa são basicamente as componentes de tensão normal ( $\sigma$ ) e cisalhante ( $\tau$ ) no plano da interface solo-geossintético, oriundas do peso do conjunto solo-caixa superior. A Figura 4.8 esquematiza o conjunto de forças atuantes no ensaio de rampa, onde  $P$  é a força vertical confinante,  $N$  é a sua componente normal,  $T$  é a sua componente cisalhante e  $F$  é a componente tangencial do peso da caixa superior.

Sabe-se que a tensão de confinamento não é uniforme ao longo da superfície de contato solo-geossintético. Ela varia com a inclinação da rampa e apresenta uma distribuição trapezoidal (Palmeira et al., 2002; Mello et al., 2003). Porém, assume-se que ela é uniformemente distribuída.

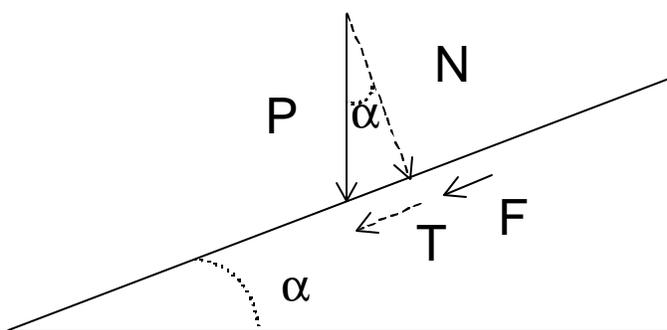


Figura 4.8 – Esquema de forças do ensaio de rampa.

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. Isto se deve à utilização da geomembrana de PEAD que reduz o atrito entre a parede interna da caixa superior e o solo. Entretanto, a componente

cisalhante (F) deve ser incorporada à tensão de cisalhamento no plano da interface. Desta forma, tem-se:

$$\sigma = \frac{P \times \cos\alpha}{A} \quad (4.2)$$

$$\tau = \frac{P \times \sin\alpha + F}{A} \quad (4.3)$$

$$F = Q \times \sin\alpha \quad (4.4)$$

Onde;

$\sigma$  = tensão normal na interface;

$\tau$  = tensão cisalhante na interface;

P = força vertical confinante

A = área de contato solo-geossintético;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da rampa;

F = componente tangencial do peso da caixa superior;

Q = peso da caixa superior.

A consideração da componente tangencial F, oriunda do peso da caixa superior na direção do deslizamento, é importante na avaliação dos resultados. Ela representa um aumento da tensão cisalhante atuante na interface solo-geossintético. A Tabela 4.5 ilustra a variação das tensões cisalhantes com e sem o acréscimo da componente do peso da caixa superior.

Tabela 4.5 – Comparação das tensões cisalhantes com e sem contribuição do peso da caixa ( $\alpha = 40^\circ$ )

| $\sigma_c$<br>(kPa) | $\tau$ (kPa)           |                             |
|---------------------|------------------------|-----------------------------|
|                     | Sem contribuição Q = 0 | Com contribuição Q = 0,24kN |
| 1,0                 | 0,64                   | 0,80                        |
| 4,6                 | 2,95                   | 3,11                        |
| 8,2                 | 5,27                   | 5,43                        |

#### 4.4 – ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO E CONFIABILIDADE

Os ensaios de calibração tinham como objetivo verificar a acurácia dos valores fornecidos pelo equipamento (ensaio de repetibilidade) e avaliar a possibilidade de reuso de uma mesma interface (ensaio de reuso).

##### 4.4.1 – Ensaios de Repetibilidade

Para avaliar a repetibilidade dos resultados fornecidos pelo equipamento, escolheu-se um dos geossintéticos, o geotêxtil, e ensaiaram-se sete corpos de prova idênticos sob a mesma tensão de confinamento. A comparação dos resultados pode ser observada na Figura 4.9. O conjunto de curvas dos ensaios solo-geotêxtil apresenta uma dispersão acentuada quanto ao deslocamento máximo, porém uma repetibilidade aceitável quanto ao ângulo de inclinação de ruptura.

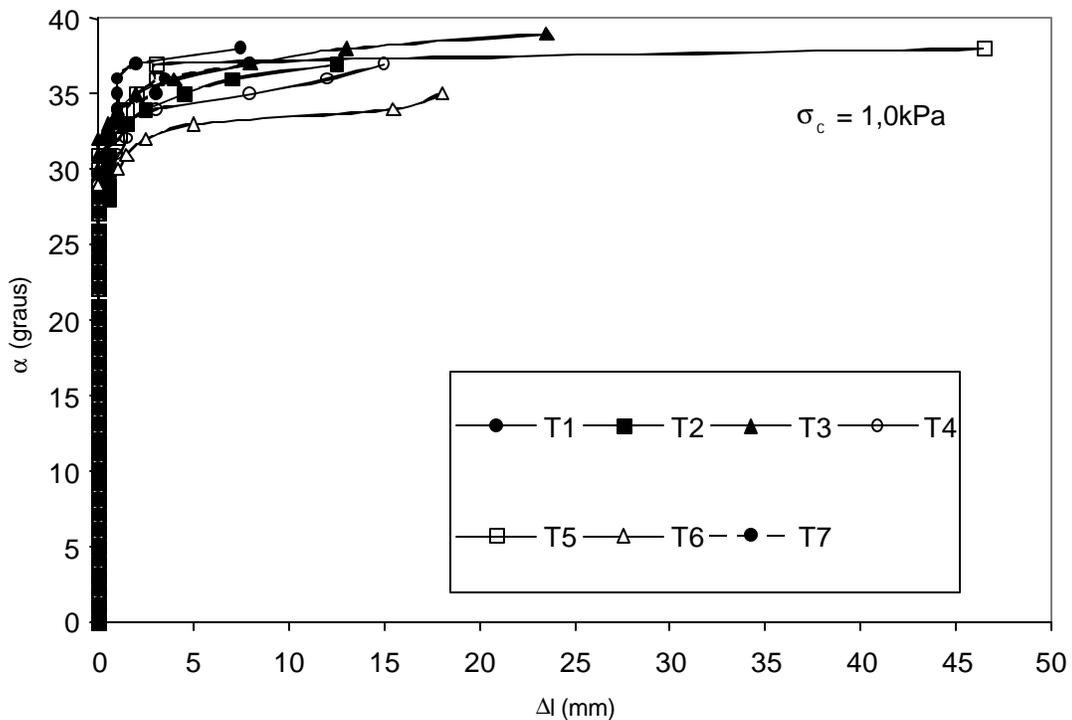


Figura 4.9 – Repetibilidade dos resultados de ensaios de rampa.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de confiabilidade em termos de deslocamento máximo ( $\Delta l_{m\acute{a}x}$ ), ângulo máximo de rampa ( $\alpha_{m\acute{a}x}$ ), tensão normal ( $\sigma$ ) e cisalhante ( $\tau$ ) no plano de interface. São também apresentados os

valores calculados de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados.

Observa-se que o ângulo de rampa na ruptura variou de 35 a 39°. A média calculada é de 37,1° com desvio padrão e coeficiente de variação de apenas 1,2° e 3,8%, respectivamente. Concluí-se, portanto, que os ensaios fornecem informações consistentes quanto ao valor de ângulo de inclinação correspondente à ruptura, comprovando a confiabilidade do equipamento.

Tabela 4.6 – Ensaio de repetibilidade na interface solo-geotêxtil

| Ensaio                      | $\Delta_{\text{máx}}$<br>(mm) | $\alpha_{\text{máx}}$<br>(graus) | Tensões na Ruptura |              |               |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------|---------------|
|                             |                               |                                  | $\sigma$ (kPa)     | $\tau$ (kPa) | $\tau/\sigma$ |
| T1                          | 7,5                           | 37                               | 0,76               | 0,72         | 0,94          |
| T2                          | 12,5                          | 37                               | 0,76               | 0,72         | 0,94          |
| T3                          | 23,5                          | 39                               | 0,74               | 0,75         | 1,01          |
| T4                          | 15,0                          | 37                               | 0,76               | 0,72         | 0,94          |
| T5                          | 46,5                          | 38                               | 0,75               | 0,73         | 0,98          |
| T6                          | 18,0                          | 35                               | 0,78               | 0,68         | 0,88          |
| T7                          | 8,0                           | 37                               | 0,76               | 0,72         | 0,94          |
| Média (graus)               |                               | 37,1                             |                    |              |               |
| Desvio Padrão (graus)       |                               | 1,21                             |                    |              |               |
| Coeficiente de Variação (%) |                               | 3,27                             |                    |              |               |

#### 4.4.2 – Ensaio de Reuso

Os ensaios de reuso visaram verificar a possibilidade de se reutilizar um mesmo corpo de prova para determinação dos parâmetros de resistência. O reuso de amostras no ensaio de rampa tem como vantagem o custo reduzido e a rapidez de execução. Porém, a interface ensaiada pode sofrer variações de estrutura em consequência dos esforços mobilizados a cada ensaio.

Desta forma, foram escolhidas duas interfaces mais críticas, solo-solo e solo-geotêxtil para a verificação da potencial variação da resistência com o reuso. Ensaio-se a mesma interface sob 1kPa de tensão confinante inicial por várias vezes. A Figura 4.10 ilustra os resultados dos ensaios de metodologia da interface

solo-geotêxtil. Observa-se uma diminuição significativa do ângulo de inclinação já no segundo reuso. Esse comportamento se deve à impregnação de solo no geotêxtil, ao alinhamento dos filamentos e ao enrugamento da amostra, que podem justificar a descontinuidade que ocorre no entorno da região correspondente a  $\alpha = 20^\circ$ .

A Figura 4.11 apresenta a variação do ângulo de inclinação com o número de ensaios da mesma interface solo-geotêxtil. Observa-se uma redução superior a 13,5% no valor de  $37^\circ$  do ângulo  $\alpha$  (pico) do primeiro para os demais ensaios de rampa. A partir do quarto ensaio, verifica-se a estabilização de  $\alpha$  (residual) em torno de  $31^\circ$ .

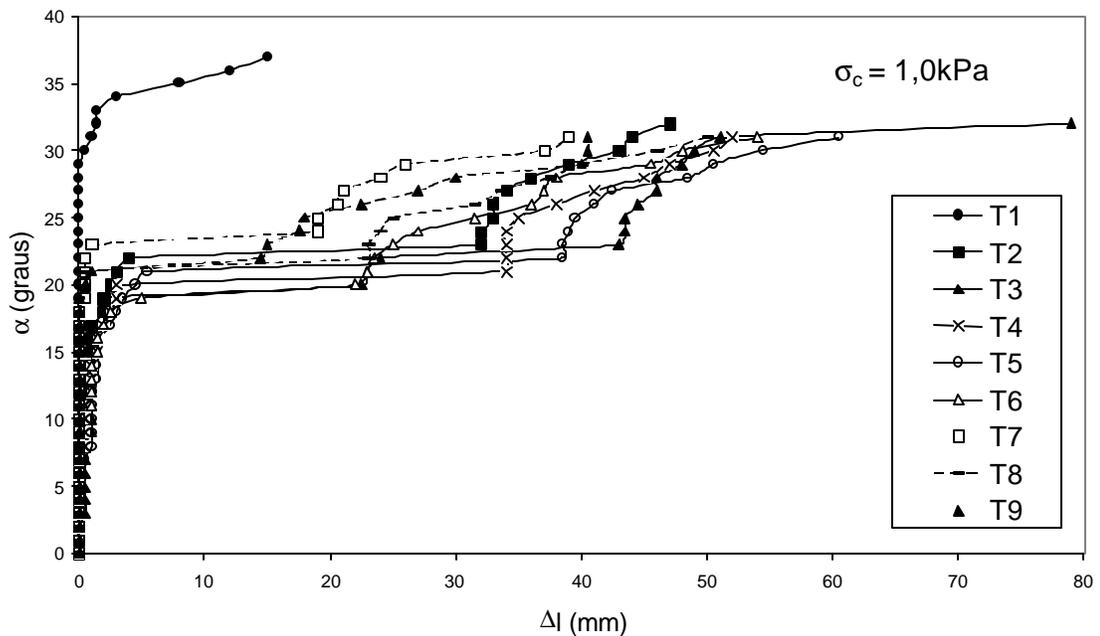


Figura 4.10 – Curvas ângulo de inclinação vs deslocamento para a mesma interface solo-geotêxtil – 9 repetições.

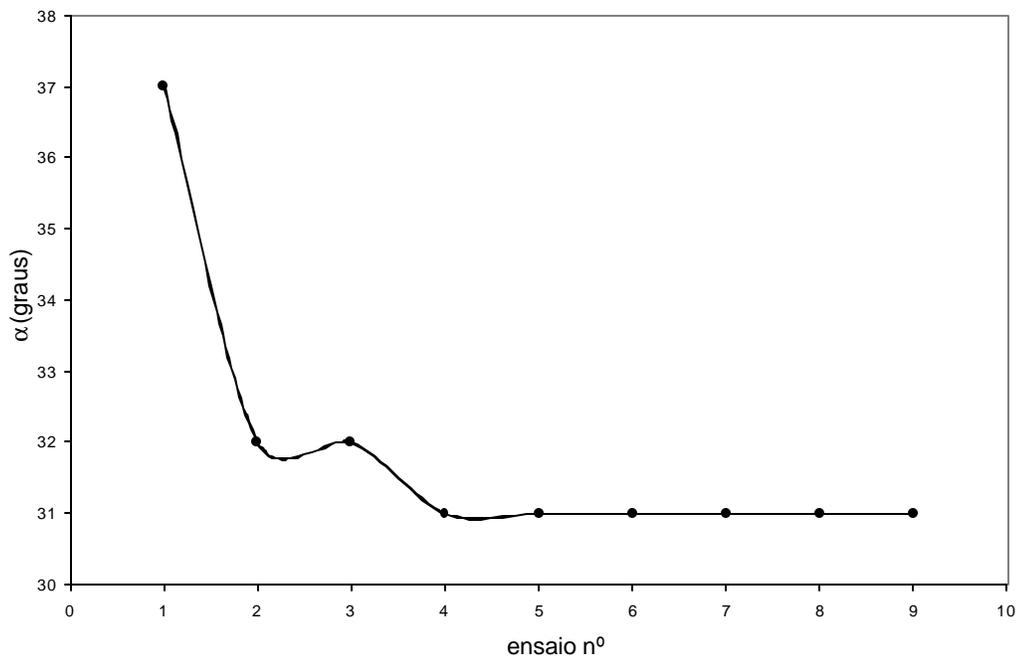


Figura 4.11 – Variação do ângulo de inclinação com o número de ensaios – Interface solo-geotêxtil.

Os resultados dos ensaios de reuso executados na interface solo-solo são apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13.

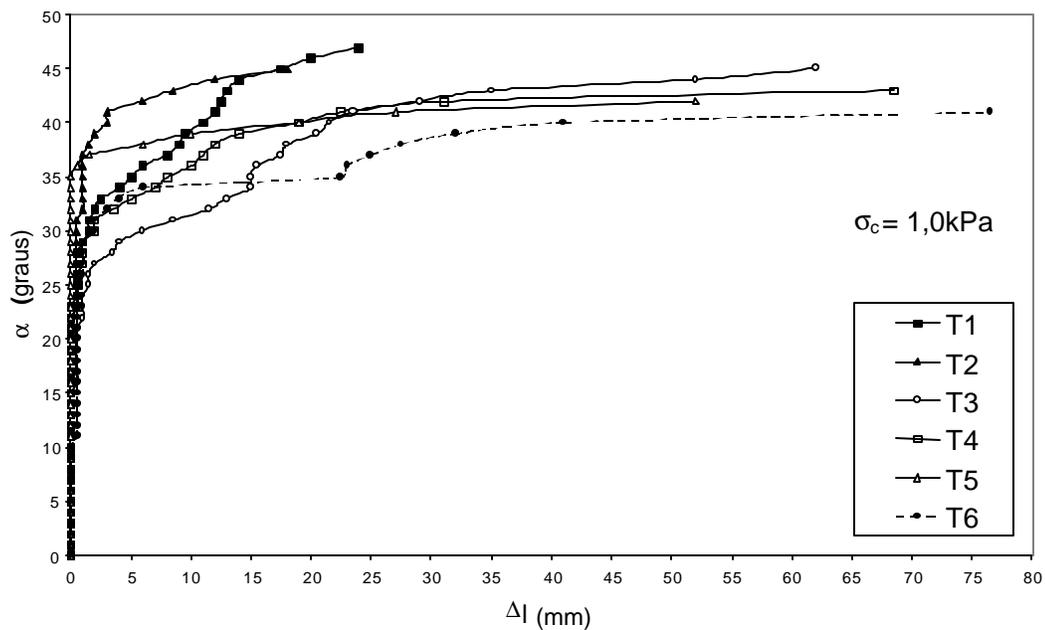


Figura 4.12 – Curvas ângulo de inclinação vs deslocamento para a mesma interface solo-solo – 6 repetições.

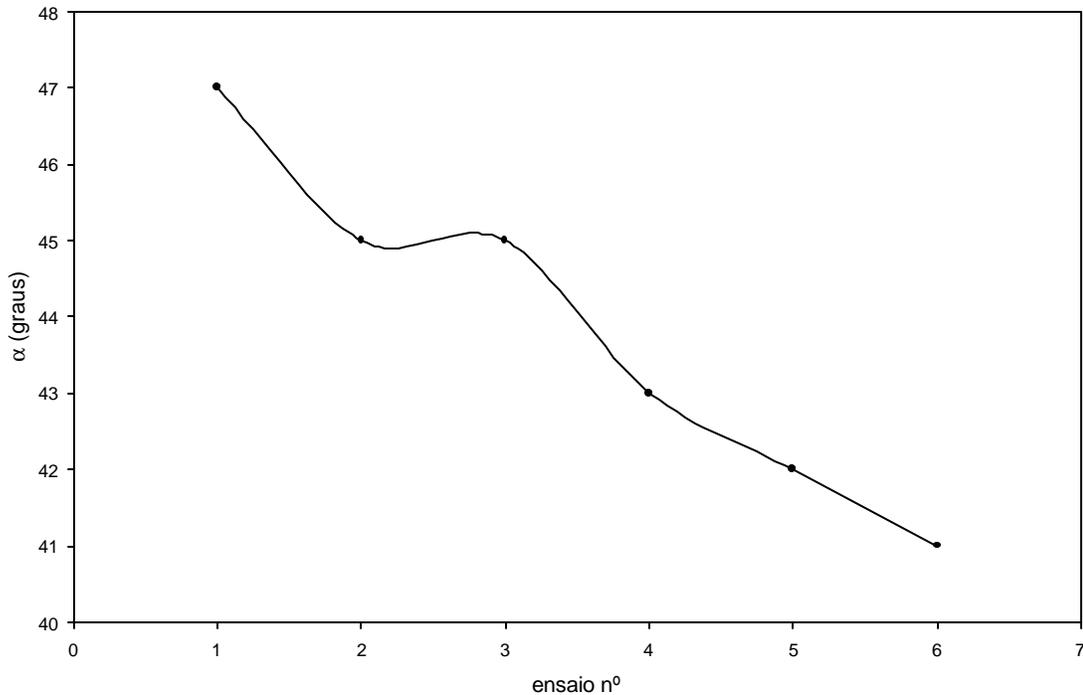


Figura 4.13 – Variação do ângulo de inclinação com o número de ensaios – Interface solo-solo.

A interface solo-solo, diferindo da interface solo-geotêxtil, não apresenta as descontinuidades no entorno de  $20^\circ$  (Figura 4.10), mas sim uma diminuição constante do ângulo de inclinação, indicando um alinhamento gradual das partículas do solo. De forma análoga, ocorre uma redução significativa do ângulo de inclinação, não atingindo, porém, um valor residual. A redução do ângulo de ruptura entre o primeiro e o sexto ensaios é da ordem de 12,8%.

Estes dois conjuntos de ensaios indicam a impossibilidade de utilizar-se uma mesma interface em mais de um ensaio de rampa.

#### 4.5 – ENSAIOS DE INTERFACE

Os ensaios de interface visaram a determinação dos parâmetros de resistência do conjunto solo-geossintético, utilizando-se o equipamento de rampa desenvolvido no presente trabalho. São estudados quatro tipos distintos de interface: solo-solo, solo-geotêxtil, solo-geogrelha e solo-geomembrana. Foram realizados sete ensaios para cada interface, sendo três para a tensão de confinamento inicial  $\sigma_c = 1,0\text{kPa}$ , três para a tensão  $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$  e um ensaio para a tensão  $\sigma_c = 8,2\text{kPa}$ .

O valor da maior tensão de confinamento foi condicionado pela análise de tombamento, apresentada no Capítulo 3 (item 3.3.4). Considerando o solo silto-argiloso e os 3 geossintéticos estudados, adotou-se como limite de inclinação da rampa, o ângulo crítico de 44,1°, correspondente à condição de 5cm de solo compactado mais 6 placas de concreto ( $\sigma_c = 8,2\text{kPa}$ ).

O comportamento de cada uma das interfaces foi avaliado quanto à repetibilidade de resultados, influência da tensão de confinamento e parâmetros de resistência. Os resultados dos ensaios de rampa são apresentados através das curvas de ângulo de inclinação da rampa vs deslocamento da caixa e razão de tensões (tensão cisalhante / tensão confinante) vs deslocamento da caixa.

É também avaliada a eficiência de cada interface em função dos parâmetros de adesão e atrito da interface. As eficiências podem ser expressas por:

$$\text{Atrito: } E_{\phi} = \frac{\text{tg}\phi_{\text{sg}}}{\text{tg}\phi} \quad (4.6)$$

$$\text{Adesão: } E_c = \frac{a}{c} \quad (4.7)$$

Onde:

$E_{\phi}$  = eficiência da interface em função de ângulo de atrito;

$\phi_{\text{sg}}$  = ângulo de atrito da interface solo-geossintético;

$\phi$  = ângulo de atrito do solo;

$E_c$  = eficiência da interface em função de adesão;

$a$  = adesão da interface solo-geossintético;

$c$  = coesão do solo.

Mello et al. (2003) utilizaram as Equações 4.6 e 4.7 com valores de  $c$  e  $\phi$  do solo obtidos em ensaios de cisalhamento direto realizados no equipamento de rampa. Entretanto, neste trabalho, os parâmetros de resistência da interface solo-solo foram determinados diretamente, a partir de ensaios de rampa.

#### 4.5.1 – Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios de rampa da interface solo-solo em função das tensões de confinamento 1,0; 4,6 e 8,2kPa estão apresentados na Figura 4.14. De

uma forma geral, os ensaios desta figura indicam um mesmo padrão de comportamento, independente da tensão de confinamento.

A mobilização da interface solo-solo ocorre para inclinações de rampa superiores a 26°, 33° e 38°, respectivamente para as tensões de confinamento de 8,2, 4,6 e 1,0kPa. Observa-se nas curvas a presença de um pequeno patamar, anterior ao deslizamento completo da caixa superior. Estes patamares podem estar relacionados à ruptura progressiva da interface.

Os principais resultados dos ensaios de rampa da interface solo-solo são resumidos na Tabela 4.7, que apresenta os valores de deslocamento máximo ( $l_{max}$ ), ângulo de inclinação da rampa ( $\alpha$ ) e tensões normal ( $\sigma$ ) e cisalhante ( $\tau$ ) atuantes na interface correspondentes à condição de ruptura, ou seja, ao completo deslizamento da caixa superior. Observa-se que a dispersão dos resultados para cada uma das tensões de confinamento pode ser considerada desprezível.

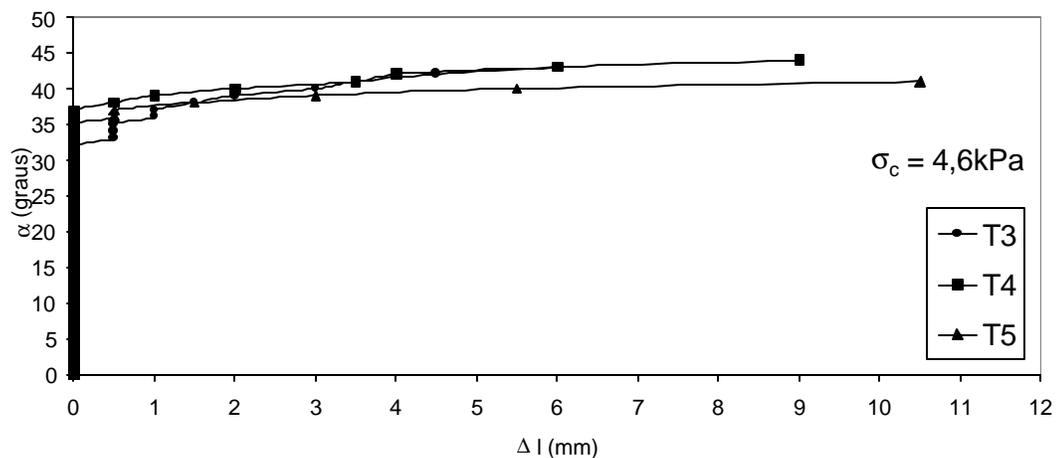
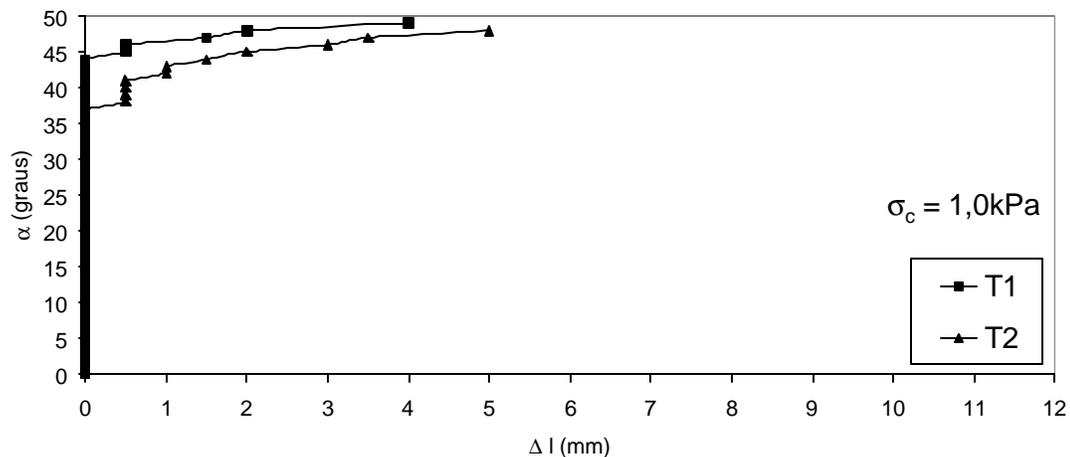


Figura 4.14 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-solo.

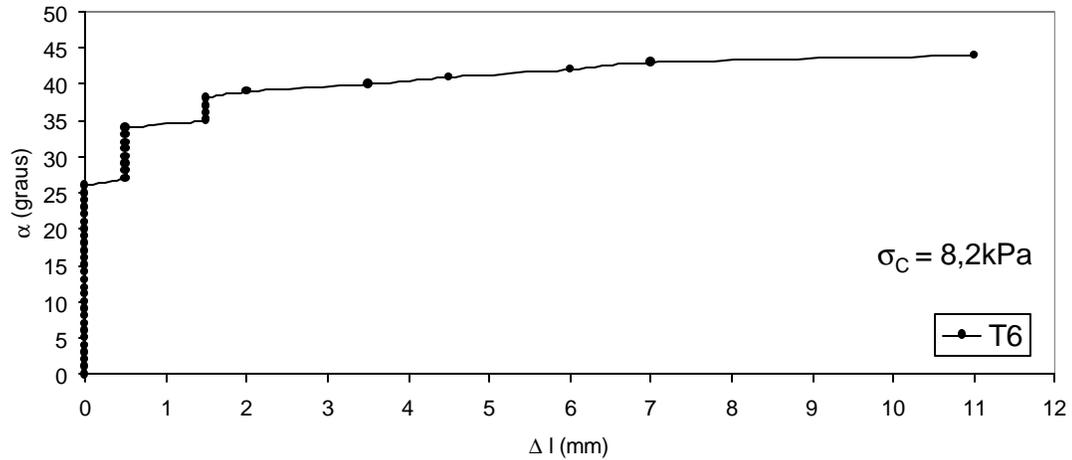


Figura 4.14 (cont.) – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-solo.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-solo

| $\sigma_c$ | Ensaio | $l_{m\acute{a}x}$<br>(mm) | $\alpha$<br>(graus) | Tensões na Ruptura |                 |      |
|------------|--------|---------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|------|
|            |        |                           |                     | $\sigma$<br>(kPa)  | $\tau$<br>(kPa) | t/s  |
| 1,0kPa     | T1     | 4,0                       | 49                  | 0,62               | 0,90            | 1,44 |
|            | T2     | 5,0                       | 48                  | 0,64               | 0,88            | 1,39 |
| 4,6kPa     | T3     | 6,0                       | 43                  | 3,33               | 3,27            | 0,98 |
|            | T4     | 9,0                       | 44                  | 3,27               | 3,33            | 1,02 |
|            | T5     | 10,5                      | 41                  | 3,44               | 3,14            | 0,91 |
| 8,2kPa     | T6     | 11,0                      | 44                  | 5,86               | 5,83            | 0,99 |

A Figura 4.15 apresenta as curvas de ângulo de inclinação e razão de tensões ( $\tau / \sigma$ ) vs deslocamento da caixa superior, em função da tensão de confinamento. Nesta figura, apresenta-se somente um dos ensaios de cada conjunto de tensão de confinamento. O ensaio selecionado para apresentação foi o que indicou o ângulo de inclinação na ruptura mais próximo da média dos valores de cada conjunto realizado.

No caso da interface solo-solo, os ensaios mais representativos são: T2, T4 e T7, correspondentes às tensões de 1,0, 4,6 e 8,2kPa, respectivamente.

Para facilitar a visualização das curvas, o eixo das ordenadas dos gráficos ângulo de inclinação e relação tensão cisalhante/tensão confinante vs deslocamento

$\Delta l$  foram seccionados. Não há prejuízo neste procedimento, pois a região eliminada corresponde à caixa superior imóvel no início dos ensaios.

Observa-se, na Figura 4.15, que o aumento da tensão de confinamento provoca uma diminuição do ângulo correspondente ao início da mobilização da interface e do ângulo de ruptura ( $\alpha$ ). Os deslocamentos máximos aumentam com a tensão de confinamento. Imediatamente antes do deslizamento completo da caixa superior, nota-se a ocorrência de maiores deslocamentos sob níveis de tensão praticamente constantes, independentemente da tensão de confinamento.

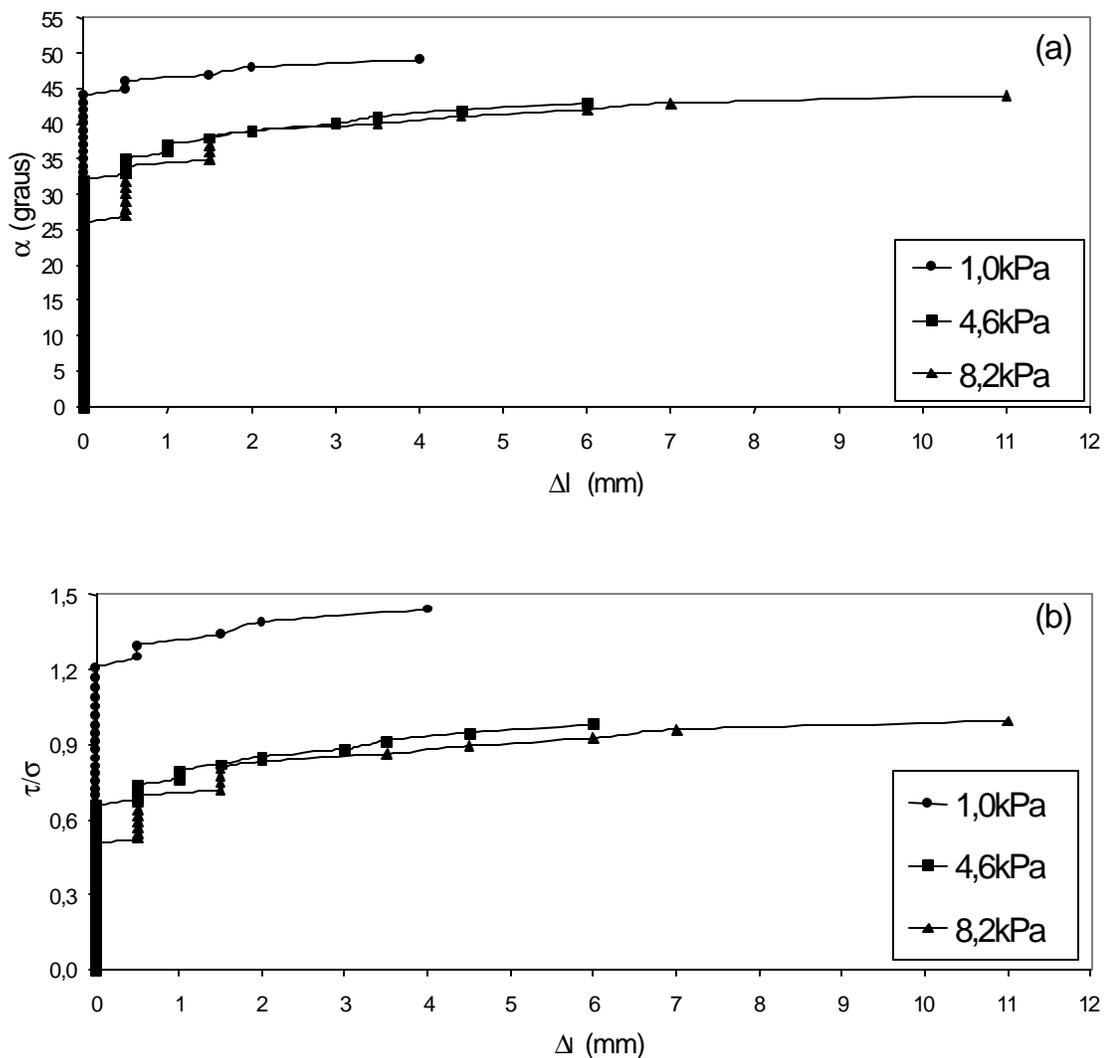


Figura 4.15 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento e (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-solo.

Em todas as curvas podem ser observadas as discontinuidades descritas anteriormente. As tensões aumentam com deslocamentos constantes até se atingir um estado de ruptura local e daí retoma-se o deslizamento da caixa. É interessante observar que as discontinuidades ocorrem em níveis de deslocamentos semelhantes para todas as tensões de confinamento. Outro aspecto notável refere-se à pequena variação dos ângulos de inclinação de deslizamento obtidos dos ensaios com  $\sigma_c = 4,6$  e  $8,2\text{kPa}$ . Estes resultados parecem indicar a tendência de estabilização do ângulo de ruptura para tensões maiores que  $4,6\text{kPa}$ .

A Figura 4.16 apresenta a envoltória de resistência da interface solo-solo, cujos parâmetros são: adesão de  $0,25\text{kPa}$  e ângulo de atrito de  $43,2^\circ$ . Este ângulo de atrito é semelhante ao obtido dos ensaios de cisalhamento direto, igual a  $43,8^\circ$ . No que se refere à adesão, como esperado, o valor é bastante inferior à coesão de  $12,3\text{kPa}$  obtida dos ensaios de cisalhamento direto. Isto se deve, provavelmente, à preparação da interface solo-solo no ensaio de rampa. É importante lembrar que a interface é isolada pela geomembrana de PEAD durante a compactação das camadas de solo da caixa superior

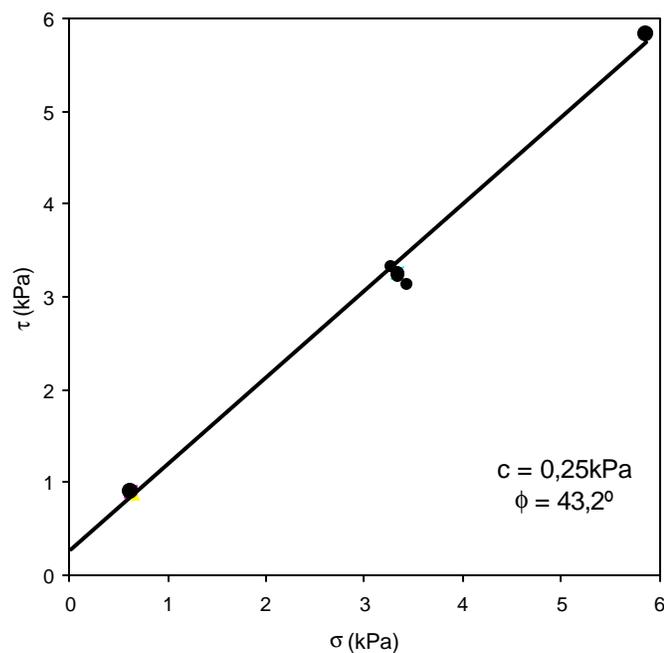


Figura 4.16 – Envoltória de resistência da interface solo-solo.

#### 4.5.2 – Interface Solo-Geotêxtil

Os resultados de todos os ensaios de rampa executados na interface solo-geotêxtil são apresentados na Figura 4.17 e resumidos na Tabela 4.8.

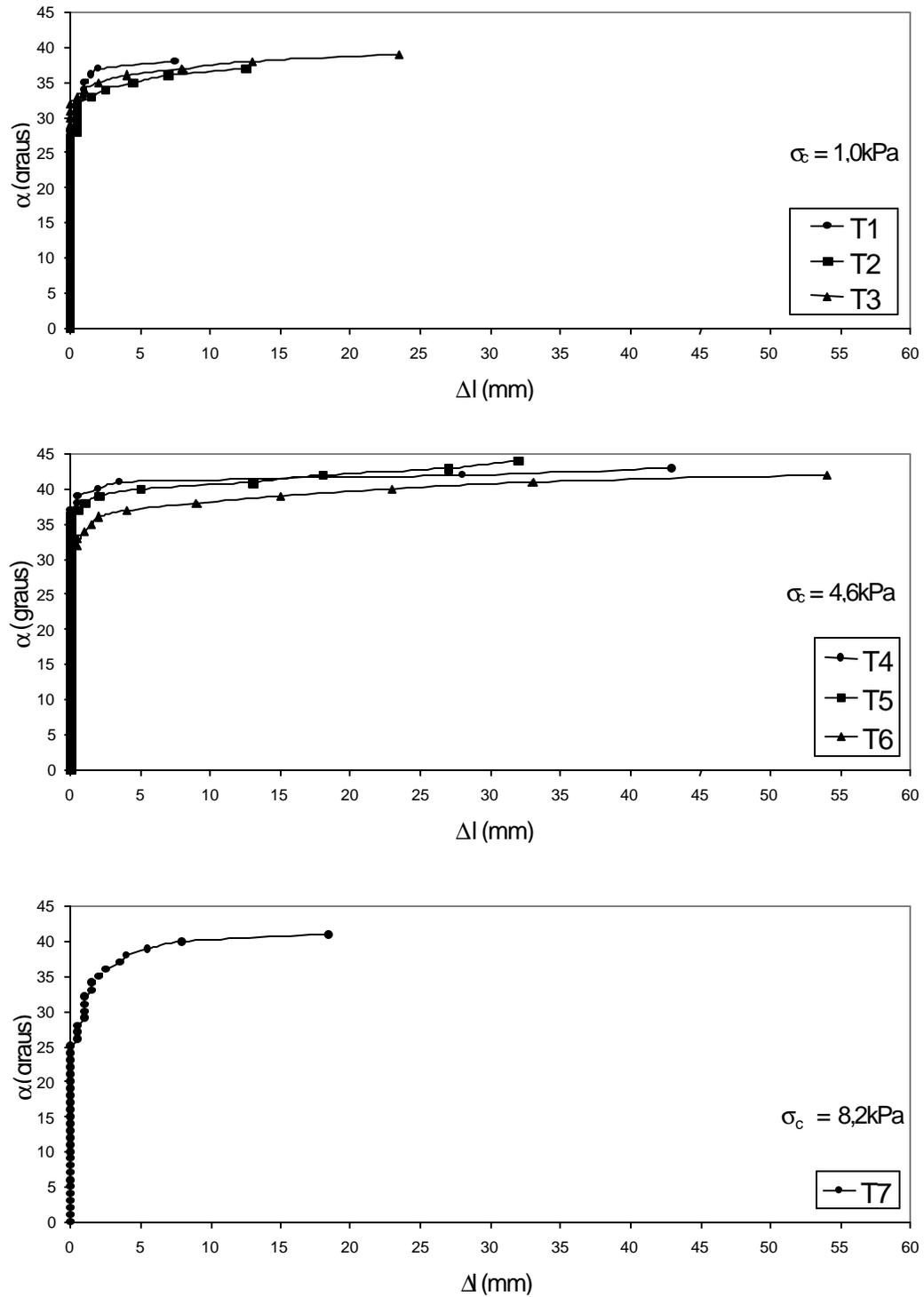


Figura 4.17 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geotêxtil.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geotêxtil

| $\sigma_c$ | Ensaio | $l_{m\acute{a}x}$<br>(mm) | $\alpha$<br>(graus) | Tensões na Ruptura |                 |      |
|------------|--------|---------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|------|
|            |        |                           |                     | $\sigma$<br>(kPa)  | $\tau$<br>(kPa) | t/s  |
| 1,0kPa     | T1     | 7,5                       | 38                  | 0,75               | 0,73            | 0,98 |
|            | T2     | 12,5                      | 37                  | 0,76               | 0,72            | 0,94 |
|            | T3     | 23,5                      | 39                  | 0,74               | 0,75            | 1,01 |
| 4,6kPa     | T4     | 43,0                      | 43                  | 3,33               | 3,27            | 0,98 |
|            | T5     | 32,0                      | 44                  | 3,27               | 3,33            | 1,02 |
|            | T6     | 54,0                      | 42                  | 3,38               | 3,20            | 0,95 |
| 8,2kPa     | T7     | 18,5                      | 41                  | 6,15               | 5,50            | 0,89 |

A observação dos resultados da Figura 4.17 revela que, de uma forma geral, os ensaios apresentam o mesmo padrão de comportamento. A mobilização da interface solo-geotêxtil ocorre para inclinações de rampa superiores a 26°, 32° e 33° para as tensões de confinamento de 8,2, 1,0 e 4,6kPa, respectivamente. A ruptura é atingida sem a ocorrência das descontinuidades mostradas pela interface solo-solo (item 4.5.1).

Quanto aos valores de ângulo de ruptura, percebe-se que a dispersão nos valores para cada uma das tensões de confinamento é reduzida, ao contrário dos deslocamentos máximos, cujas diferenças podem atingir até 22,0mm, conforme se observa nos resultados dos ensaios T5 e T6 (Tabela 4.8). Esta dispersão não foi verificada nos ensaios da interface solo-solo.

A Figura 4.18 apresenta as curvas ângulo de inclinação  $\alpha$  e razão tensão cisalhante/tensão confinante vs deslocamento dos ensaios mais representativos de cada uma das tensões de confinamento, T1, T4 e T7, correspondentes a  $\sigma_c = 1,0$ , 4,6 e 8,2kPa, respectivamente.

Observa-se, na Figura 4.18, que o aumento da tensão de confinamento provoca um aumento do ângulo correspondente à ruptura, apesar dos valores semelhantes obtidos para  $\sigma_c = 4,6$  e 8,2kPa. Isto também foi verificado nos ensaios de interface solo-solo.

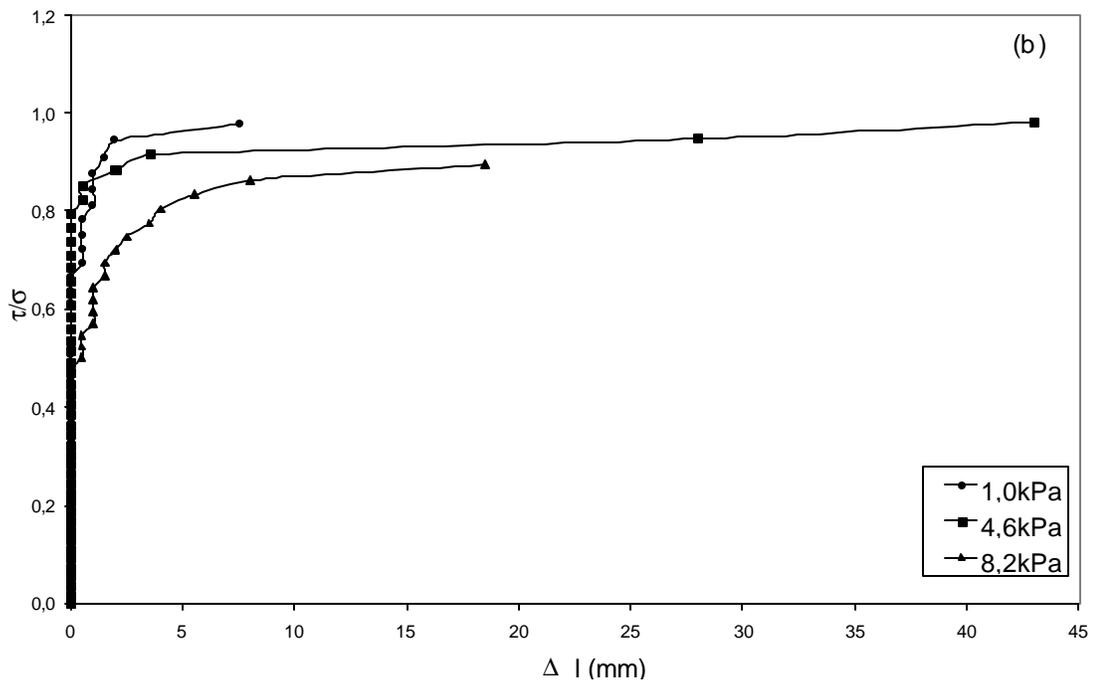
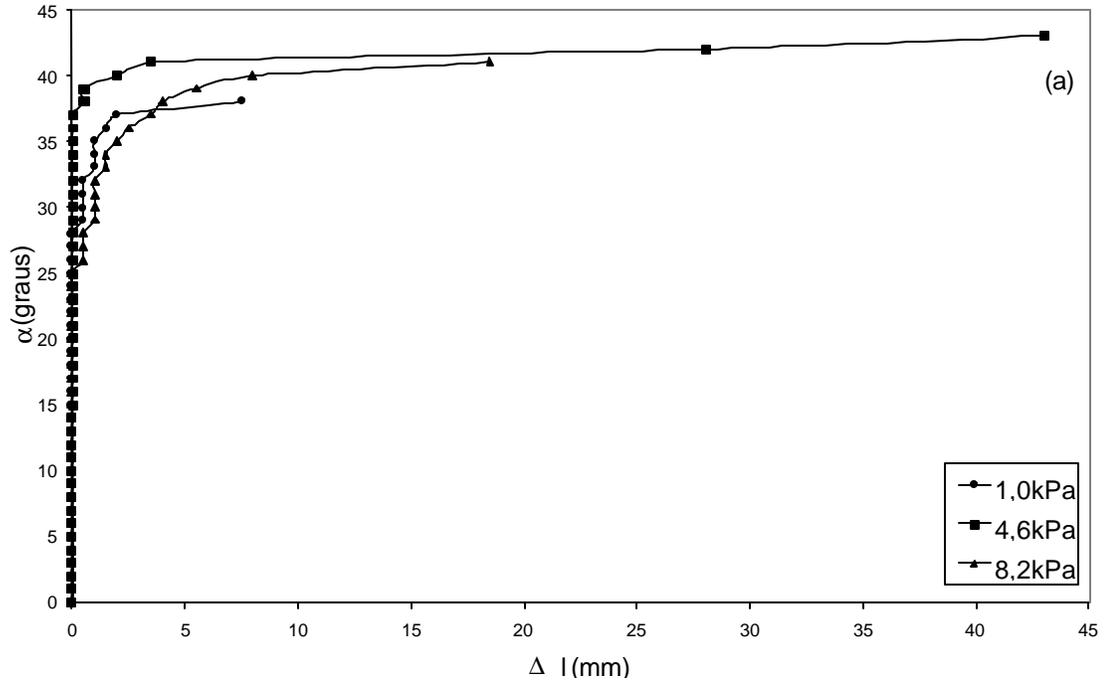


Figura 4.18 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento e (b) Razão de tensões ( $\tau / \sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-geotêxtil.

A dispersão não desprezível dos deslocamentos máximos impede a identificação de uma tendência em relação ao aumento da tensão de confinamento. O único aspecto experimental a ser reportado consiste no fato dos maiores deslocamentos (Tabela 4.8) serem associados à ocorrência de estrições e enrugamentos notáveis nas amostras de geotêxtil, sobretudo após os ensaios com maiores tensões de confinamento, conforme ilustrado nas Figuras 4.19 e 4.20. Efetivamente, as tensões atuantes no ensaio de rampa solicitam a interface solo-geotêxtil e os maiores deslocamentos situam -se no entorno de  $40^\circ$ .

Imediatamente antes do deslizamento completo da caixa superior, nota-se a ocorrência de maiores deslocamentos sob níveis de tensão suavemente crescentes (Fig. 4.18), em oposição ao comportamento da interface solo-solo, onde as tensões são praticamente constantes. Os resultados também parecem indicar a tendência de estabilização de ângulo de ruptura para tensões maiores que 4,6kPa.

A envoltória de resistência é apresentada na Figura 4.21 e os parâmetros obtidos para a interface solo-geotêxtil foram uma adesão de 0,16kPa e um ângulo de atrito de interface de  $41,4^\circ$ , inferiores aos obtidos dos ensaios na interface solo-solo ( $c = 0,25\text{kPa}$  e  $\phi = 43,2^\circ$ ).



Figura 4.19 – Enrugamento da amostra de geotêxtil após o ensaio ( $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ ).



Figura 4.20 – Estricção da amostra de geotêxtil após o ensaio ( $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ ).

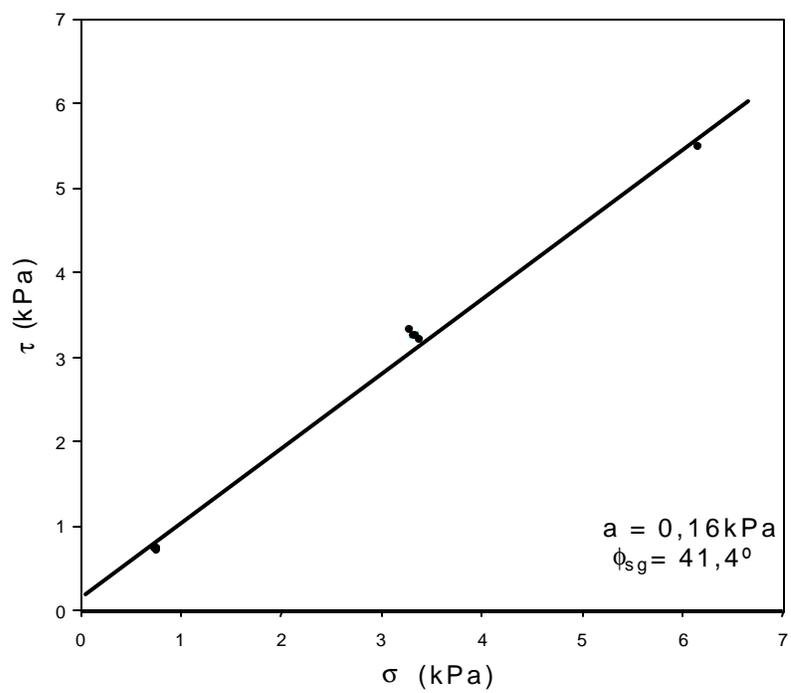


Figura 4.21 – Envoltória de resistência da interface solo-geotêxtil.

### 4.5.3 – Interface Solo-Geogrelha

Os resultados dos ensaios de rampa para a interface solo-geogrelha são apresentados na Figura 4.22 e resumidos na Tabela 4.9.

A observação dos resultados da Figura 4.22 mostra que, de uma forma geral, os ensaios apresentam um mesmo padrão de comportamento, semelhante ao da interface solo-geotêxtil. A mobilização da interface solo-geogrelha ocorre para inclinações de rampa superiores a 33°, 34° e 38° para as tensões de confinamento de 8,2, 4,6 e 1,0kPa, respectivamente.

De forma análoga à interface solo-geotêxtil, a ruptura é atingida sem a ocorrência das descontinuidades mostradas pela interface solo-solo (item 4.5.1). Quanto aos valores de ângulo de ruptura (Tabela 4.9), percebe-se que não há dispersão dos valores para cada uma das tensões de confinamento. Isto pode ser associado à alta rigidez da geogrelha, que, ao contrário do geotêxtil, não sofre enrugamentos e/ou estrições. Contudo, nota-se uma pequena dispersão em relação aos deslocamentos máximos para  $\sigma_c = 1,0\text{kPa}$ .

A Figura 4.23 apresenta as curvas ângulo de inclinação  $\alpha$  e razão de tensões ( $\tau / \sigma$ ) vs deslocamento dos ensaios mais representativos de cada uma das tensões de confinamento, T3, T4 e T7, correspondentes a  $\sigma_c = 1,0, 4,6$  e  $8,2\text{kPa}$ , respectivamente.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geogrelha

| $\sigma_c$ | Ensaio | $\Delta l_{\text{máx}}$<br>(mm) | $\alpha$<br>(graus) | Tensões na Ruptura |                 |      |
|------------|--------|---------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|------|
|            |        |                                 |                     | $\sigma$<br>(kPa)  | $\tau$<br>(kPa) | t/s  |
| 1,0kPa     | T1     | 13,0                            | 46                  | 0,66               | 0,86            | 1,3  |
|            | T2     | 28,5                            | 46                  | 0,66               | 0,86            | 1,3  |
|            | T3     | 27,0                            | 46                  | 0,66               | 0,86            | 1,3  |
| 4,6kPa     | T4     | 11,0                            | 44                  | 3,27               | 3,33            | 1,02 |
|            | T5     | 12,0                            | 44                  | 3,27               | 3,33            | 1,02 |
|            | T6     | 8,5                             | 44                  | 3,27               | 3,33            | 1,02 |
| 8,2kPa     | T7     | 13,5                            | 44                  | 5,86               | 5,83            | 0,99 |

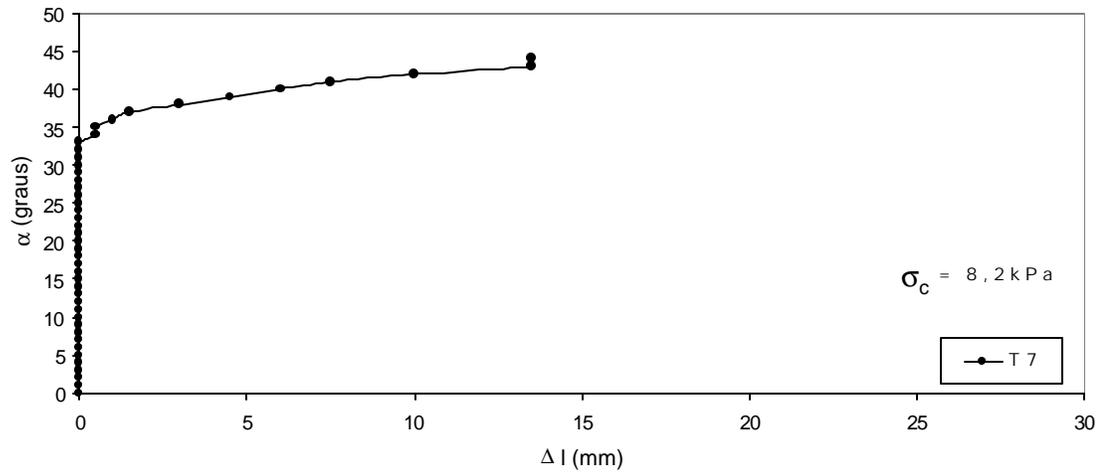
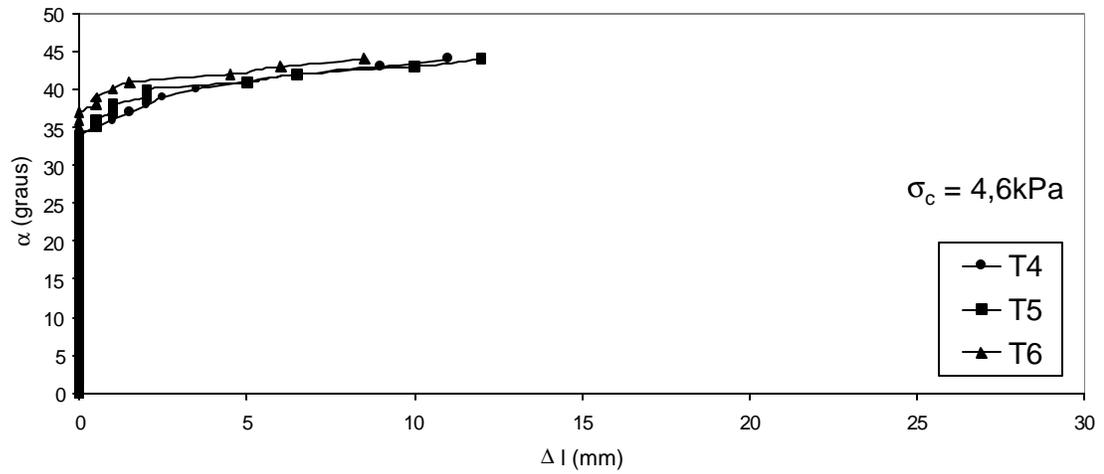
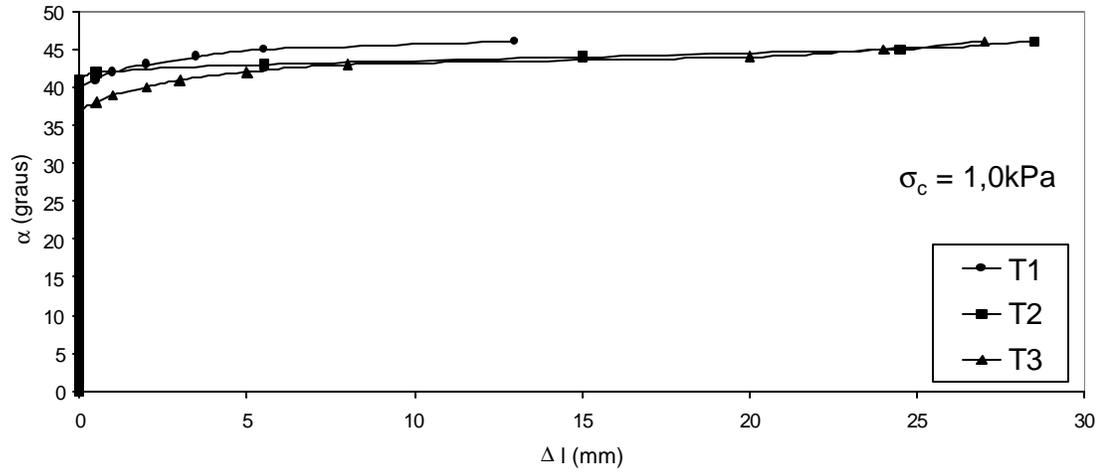


Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geogrelha.

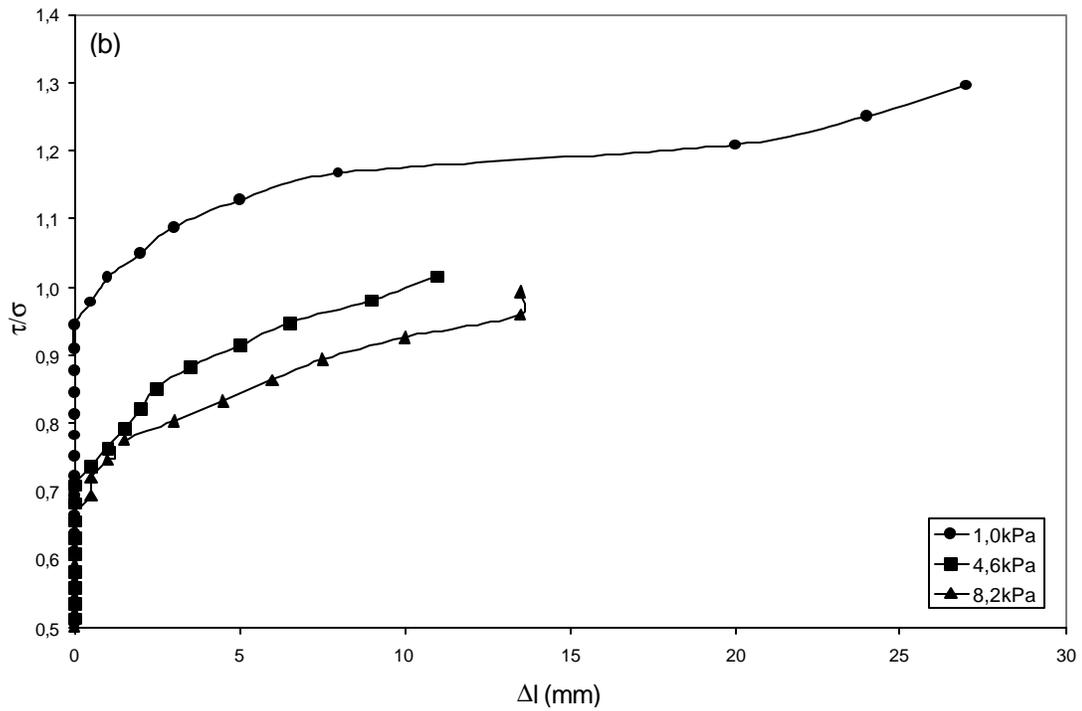
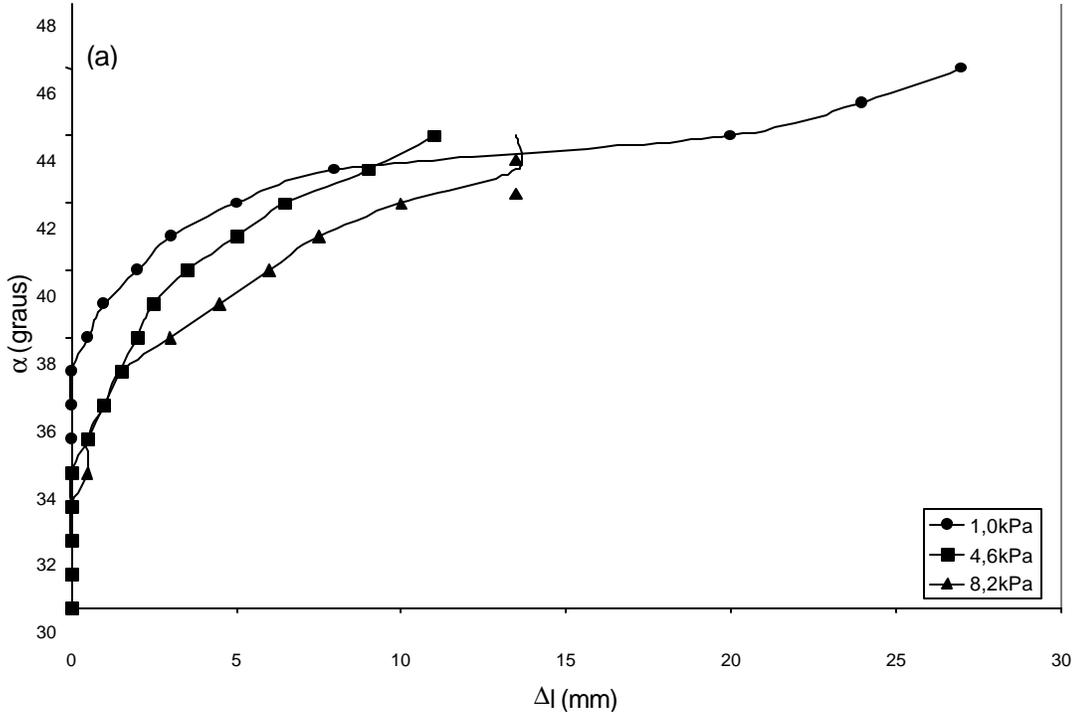


Figura 4.23 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento e (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-geogrelha.

Observa-se, na Figura 4.23, que o aumento da tensão de confinamento provoca uma redução do ângulo correspondente à ruptura e dos deslocamentos máximos, apesar dos valores semelhantes obtidos para  $\sigma_c = 4,6$  e  $8,2\text{kPa}$ . Esta tendência é oposta à verificada nos ensaios de interface solo-solo e solo-geotêxtil.

O deslizamento completo da caixa superior é precedido por maiores deslocamentos sob níveis de tensão suavemente crescentes (Figura 4.23), de forma análoga ao comportamento da interface solo-geotêxtil. Os resultados não parecem indicar uma estabilização de ângulo de ruptura, independentemente das tensões de confinamento. Ao contrário das outras interfaces, nota-se que o ângulo de ruptura tende a aumentar com o deslocamento na região de pico para as 3 tensões de confinamento.

A Figura 4.24 apresenta a envoltória de resistência da interface solo-geogrelha com parâmetros iguais a  $0,22\text{kPa}$  de adesão e  $43,7^\circ$  de ângulo de atrito de interface, superiores aos obtidos na interface solo-geotêxtil ( $a = 0,16\text{kPa}$  e  $\phi_{sg} = 41,4^\circ$ ) e semelhantes aos da interface solo-solo ( $a = 0,25\text{kPa}$  e  $\phi = 43,2^\circ$ ).

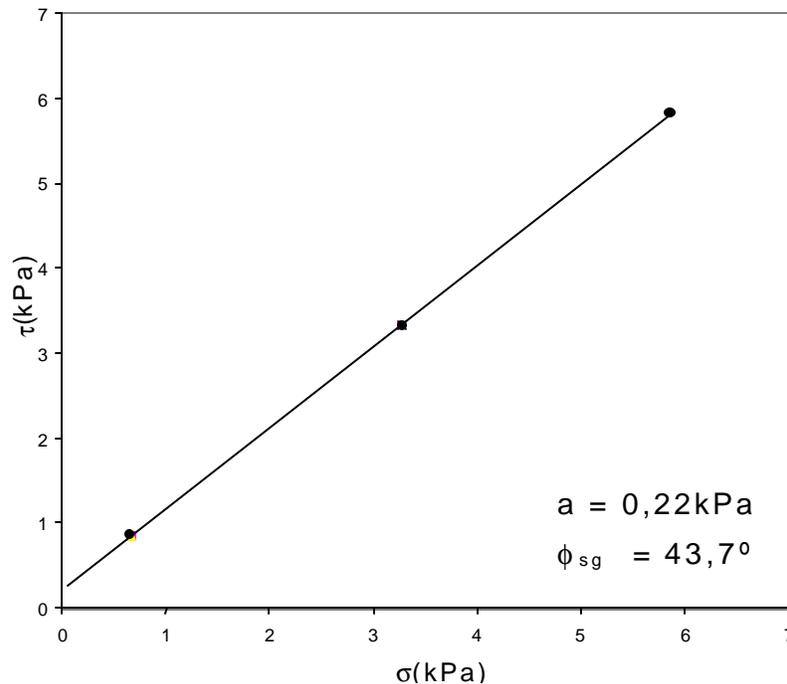


Figura 4.24 – Envoltória de resistência da interface solo-geogrelha.

#### 4.5.4 – Interface Solo-Geomembrana

Os resultados dos ensaios de rampa para a interface solo-geomembrana são apresentados na Figura 4.25 e resumidos na Tabela 4.10. A Figura 4.26 apresenta as curvas ângulo de inclinação  $\alpha$  e razão de tensões ( $\tau / \sigma$ ) vs deslocamento dos ensaios mais representativos de cada uma das tensões de confinamento, T2, T6 e T7 correspondentes a  $\sigma_c = 1,0, 4,6$  e  $8,2\text{kPa}$ , respectivamente.

As Figuras 4.25 e 4.26 sugerem um comportamento um pouco diferente dos apresentados pelos outros geossintéticos ensaiados. A mobilização da interface inicia-se para um ângulo de inclinação de  $32^\circ$ , sendo este um valor médio e representativo para todas as tensões de confinamento dos ensaios. Os deslocamentos máximos tendem a aumentar com a tensão de confinamento. Porém, existe uma dispersão considerável dos valores de deslocamento máximo para ensaios com a mesma tensão de confinamento. Esta variação é da ordem de 100% para os ensaios com  $\sigma_c = 1\text{kPa}$  (Tabela 4.10). O início da mobilização para as tensões de confinamento superiores a  $1\text{kPa}$  é abrupto, seguido de grandes deslocamentos da caixa superior sob níveis de tensão crescentes (Fig. 4.26).

Outra observação pertinente é que o ângulo de ruptura é praticamente o mesmo para qualquer tensão de confinamento, o que não foi notado em nenhum dos outros ensaios de interface. Além disto, os resultados não parecem indicar uma estabilização de ângulo de ruptura, independentemente das tensões de confinamento. Observa-se, na Figura 4.26, que o ângulo de ruptura tende a aumentar com o deslocamento na região de pico para as 3 tensões de confinamento, de forma análoga à interface solo-geogrelha.

Observa-se ainda que a ocorrência de elevados deslocamentos máximos está associada ao enrugamento e estricção sofridos pela geomembrana, conforme visualizado na Figura 4.27.

A Figura 4.28 apresenta a envoltória de resistência da interface solo-geogrelha com parâmetros iguais a  $0,17\text{kPa}$  de adesão e  $35,0^\circ$  de ângulo de atrito de interface. A adesão é semelhante ao valor obtido na interface solo-geotêxtil e igual a  $0,16\text{kPa}$ , e inferior ao da interface solo-geogrelha de  $0,22\text{kPa}$ . O ângulo de atrito da interface solo-geomembrana, como já era previsto, é bastante inferior ao de todas as outras interfaces ensaiadas.

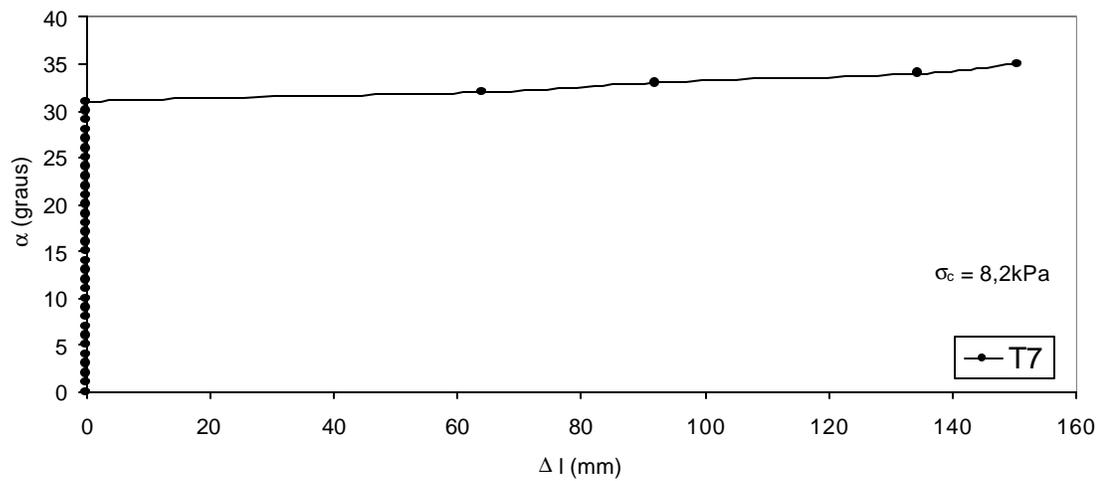
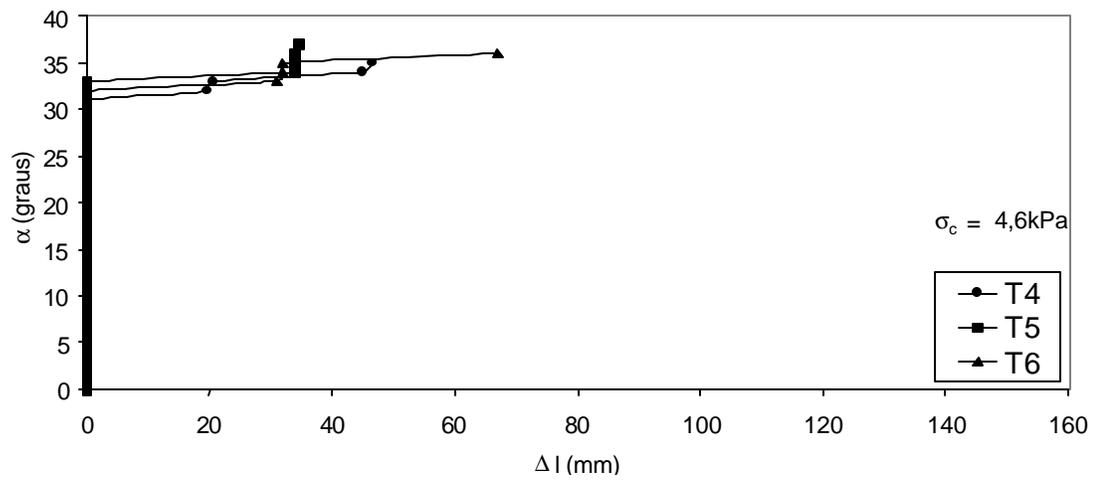
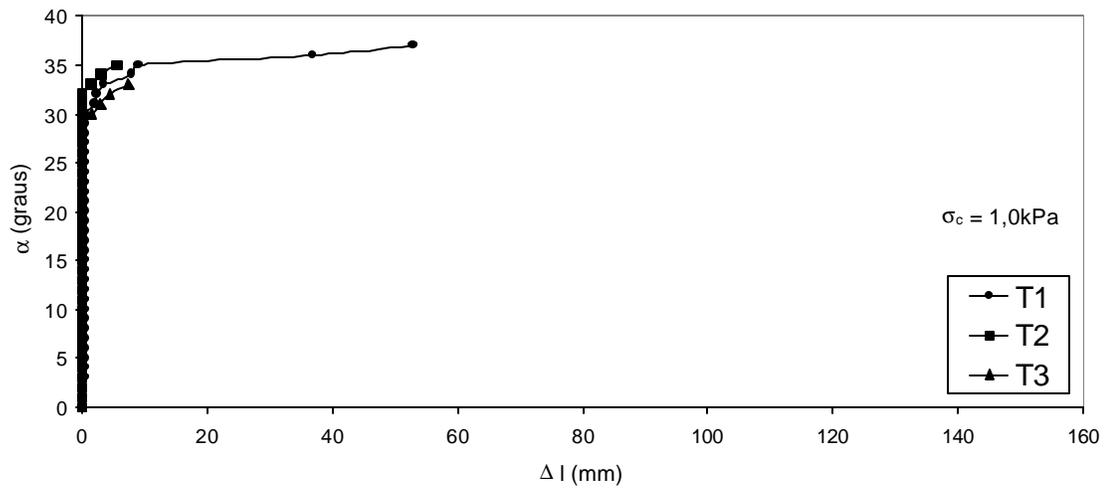


Figura 4.25 – Resultados dos ensaios de rampa da interface solo-geomembrana.

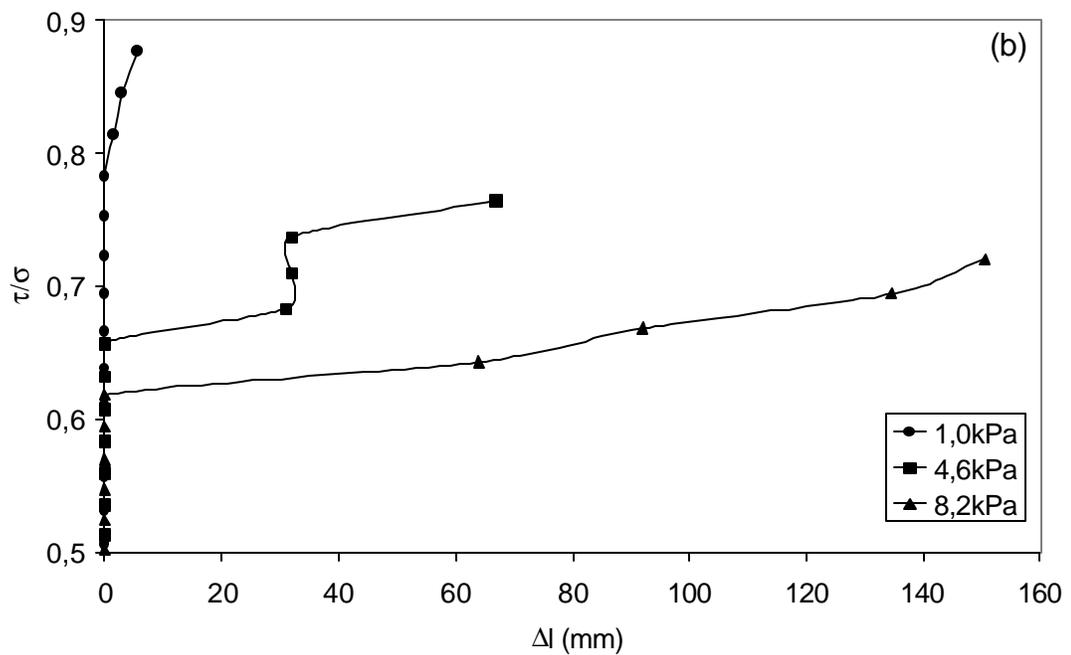
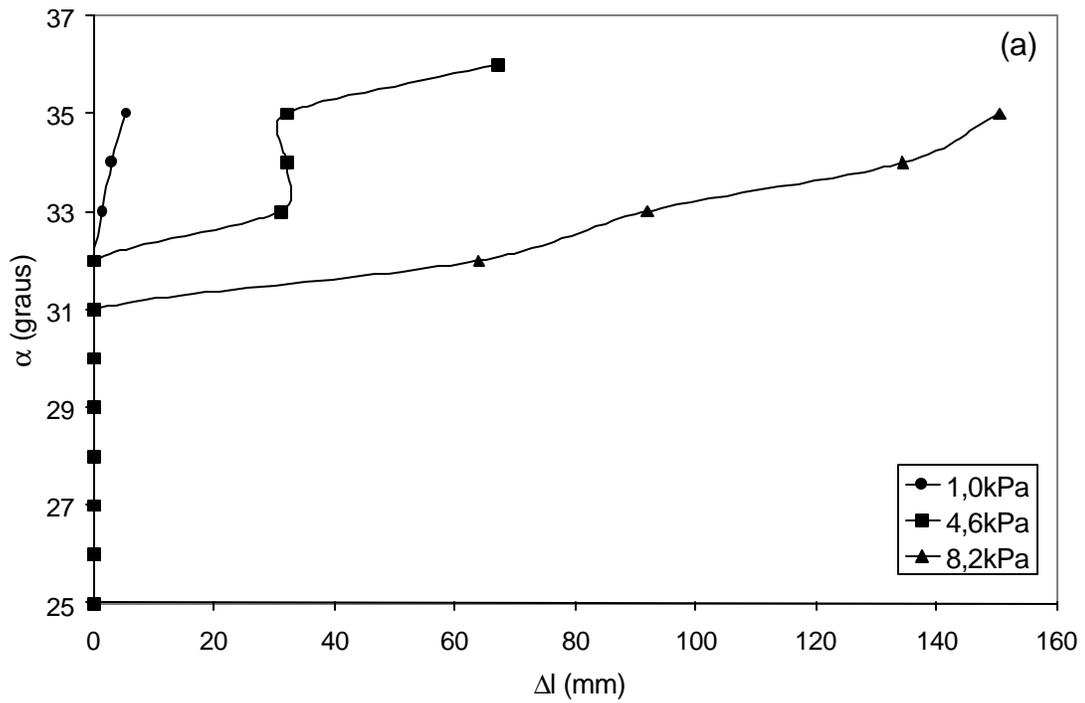


Figura 4.26 – Curvas: (a) Ângulo de inclinação vs deslocamento e (b) Razão de tensões ( $\tau/\sigma$ ) vs deslocamento – Interface solo-geomembrana.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de rampa na interface solo-geomembrana

| $\sigma_c$ | Ensaio | $l_{m\acute{a}x}$<br>(mm) | $\alpha$<br>(graus) | Tensões na Ruptura |                 |       |
|------------|--------|---------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|-------|
|            |        |                           |                     | $\sigma$<br>(kPa)  | $\tau$<br>(kPa) | $t/s$ |
| 1,0kPa     | T1     | 53,0                      | 37                  | 0,76               | 0,72            | 0,94  |
|            | T2     | 5,5                       | 35                  | 0,78               | 0,68            | 0,88  |
|            | T3     | 7,5                       | 33                  | 0,80               | 0,65            | 0,81  |
| 4,6kPa     | T4     | 46,5                      | 35                  | 3,73               | 2,75            | 0,74  |
|            | T5     | 34,5                      | 37                  | 3,63               | 2,88            | 0,79  |
|            | T6     | 67,0                      | 36                  | 3,68               | 2,81            | 0,76  |
| 8,2kPa     | T7     | 150,5                     | 36                  | 6,68               | 4,81            | 0,72  |



(a)



(b)

Figura 4.27 – Deformações da geomembrana: (a) Estricção e (b) Enrugamento ( $\sigma_c = 4,6\text{kPa}$ ).

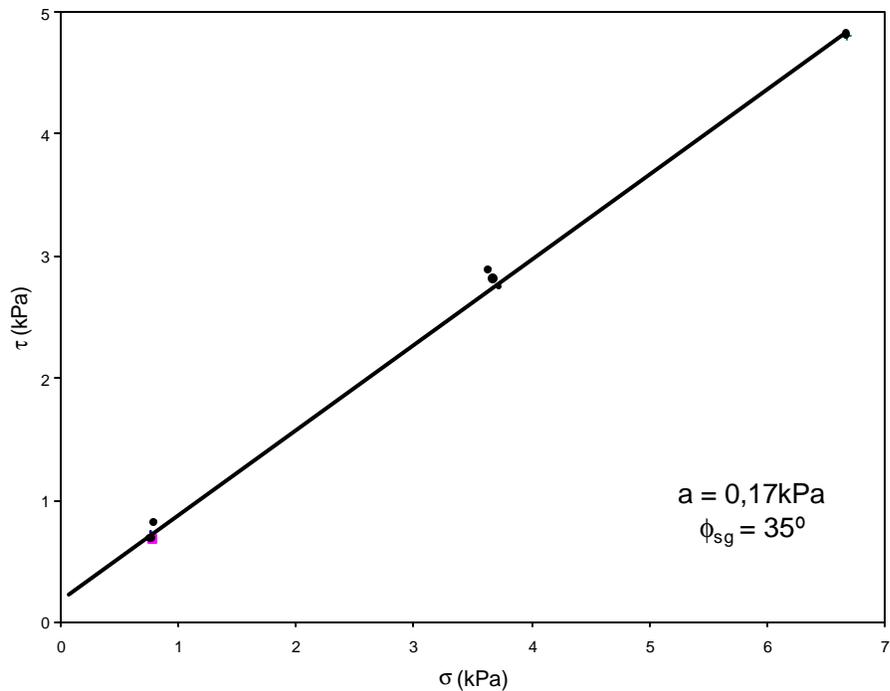


Figura 4.28 – Envoltória de resistência da interface solo-geomembrana.

#### 4.5.5 – Resistência e Eficiência de Interação Solo-Geossintético

A Figura 4.29 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces solo-geossintético ensaiadas no equipamento de rampa.

A Tabela 4.11 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência obtidos e as eficiências de interação em função da adesão ( $E_c$ ) e do ângulo de atrito ( $E_\phi$ ) para cada uma das interfaces. As eficiências foram calculadas através das Equações 4.6 e 4.7, considerando os parâmetros de resistência da interface solo-solo, obtidos da envoltória de resistência dos ensaios de rampa ( $c = 0,25\text{kPa}$  e  $\phi = 43,2^\circ$ ). Estes parâmetros foram utilizados, em detrimento dos parâmetros de resistência obtidos de ensaios de cisalhamento direto, a fim de garantir o mesmo estado, tipo e nível de tensões das interfaces testadas.

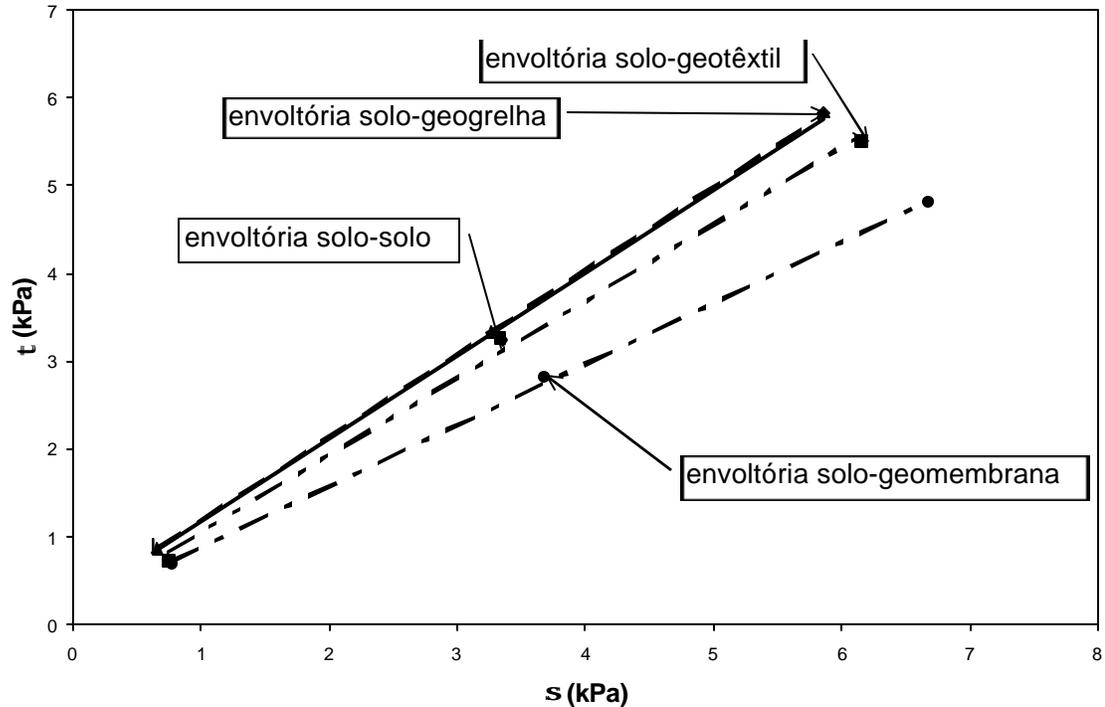


Figura 4.29 – Envoltórias de resistência das interfaces solo-solo e solo-geossintéticos.

Tabela 4.11 – Parâmetros de resistência e eficiência de interação das interfaces

| Interface        | $a$ (kPa) | $\phi_{sg}$ (graus) | $E_c$ | $E_\phi$ |
|------------------|-----------|---------------------|-------|----------|
| 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 Tabela 4.11 mostra que os valores obtidos de  $E_\phi$  são próximos à unidade para as interfaces solo-geotêxtil e solo-geogrelha e igual a 0,81 para a interface solo-geomembrana. O valor mais reduzido de  $E_\phi$  para a interface solo-geomembrana é típico da estrutura mais lisa deste geossintético.

Apesar de texturada em uma das faces, a geomembrana ainda é uma superfície de menor interação com o solo, quando comparada com o geotêxtil e a geogrelha. No caso do geotêxtil não-tecido, a penetração do solo nos filamentos e a distribuição errática dos próprios filamentos são os maiores responsáveis pela resistência da superfície. Para a geogrelha, a resistência é oferecida pelo atrito solo-

geogrelha, atrito solo-solo nas aberturas da malha e atrito das junções dos elementos da malha.

Os valores obtidos de  $E_c$  encontrados foram de 0,88 para a interface solo-geogrelha, 0,68 para a solo-geomembrana e 0,64 para solo-geotêxtil. Estes valores estão dentro da faixa usualmente reportada na literatura (Koerner e Koerner, 1986; Koutsourais et al., 1998; Koerner, 1988; Athanasopoulos, 1996).

#### 4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por finalidade caracterizar os materiais utilizados na pesquisa, descrever as metodologias de preparação de amostras e de execução de ensaios, bem como, apresentar as metodologias de interpretação e análise dos resultados dos ensaios de rampa.

A metodologia de preparação dos corpos de prova obedece às recomendações das normas nacionais e internacionais, quando existentes e pode ser considerada adequada, desde que sejam tomados os devidos cuidados na amostragem e estocagem dos geossintéticos e, principalmente, no controle de umidade e densidade do solo.

Os ensaios de rampa são simples e fáceis de serem executados e monitorados. A instrumentação utilizada neste trabalho consistiu de dois medidores de ângulo e um medidor de deslocamento do tipo *tell tale*, acoplado à caixa superior. Estes instrumentos, apesar de rústicos, mostraram funcionamento e acurácia adequados durante os ensaios de rampa.

O equipamento de rampa teve seu desempenho avaliado através de uma série de ensaios preliminares. Os ensaios de repetibilidade tiveram por objetivo avaliar a acurácia dos resultados. Os ensaios de reuso avaliaram a possibilidade de se utilizar uma mesma amostra de geossintético em vários ensaios. A resposta foi positiva em relação à consistência dos resultados. A tentativa de reuso da amostra i, porém, foi abandonada devido à perda significativa de resistência da interface após o primeiro ensaio.

O programa experimental envolveu ensaios de rampa em quatro tipos distintos de interface: solo-solo, solo-geotêxtil, solo-geogrelha e solo-geomembrana. Os ensaios de interface solo-solo tinham como objetivo a avaliação do equipamento e a comparação com ensaios convencionais de cisalhamento direto. Além disto, os ensaios forneceram parâmetros de resistência da interface solo-solo, os quais foram

utilizados na determinação das eficiências de interação das interfaces em termos de adesão e ângulo de atrito. Esta proposta evita a utilização de parâmetros obtidos de ensaios convencionais de cisalhamento direto e, portanto, garante condições similares de nível de confinamento e velocidade de carregamento na determinação de todos os parâmetros.

Os resultados dos ensaios de rampa são apresentados de forma não usual, através de curvas de inclinação de rampa vs deslocamento e razão de tensões vs deslocamento. Esta forma de apresentação permite a determinação direta de todas as variáveis em qualquer momento do ensaio, facilitando a sua interpretação.

Quanto aos resultados dos ensaios de rampa, pode-se afirmar que se obteve um comportamento das interfaces semelhante ao reportado na bibliografia. Os parâmetros de resistência da interface solo-solo são comparáveis aos obtidos através de uma campanha de cisalhamento direto, principalmente quanto aos ângulos de atrito. O parâmetro de coesão de interface solo-solo foi inferior ao intercepto coesivo do solo. Esta diferença pode ser explicada em parte pelo processo de preparação da amostra no equipamento de rampa.

Em relação aos ensaios de interface solo-geossintéticos, verificou-se que o tipo de material condiciona os resultados. A interação entre o solo e o geossintético é função de vários fatores, entre eles, as características físicas como rugosidade e rigidez.

## CAPÍTULO V

### 5 – 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. A escolha do ensaio mais adequado é função do tipo de geossintético e da sua solicitação na massa de solo.

Sendo assim, este trabalho teve como finalidade construir um equipamento capaz de realizar estes três ensaios utilizando amostras de grandes dimensões (1m<sup>2</sup>).

O objetivo principal consistiu em habilitar o equipamento desenvolvido para a execução de ensaios de rampa de interfaces solo-geossintético. O protótipo do equipamento e acessórios do ensaio de rampa foram construídos e testados para quantificação do atrito entre caixas e limite de utilização dos pesos de confinamento. Foram também realizados ensaios de repetibilidade e de reuso de interfaces para a avaliação da confiabilidade do equipamento e metodologia do ensaio de rampa. Foram ensaiados 4 tipos de interfaces, solo-solo, solo-geotêxtil, solo-geogrelha e solo-geomembrana, Os resultados dos ensaios de rampa foram interpretados e analisados em termos de resistência das interfaces solo-geossintético.

#### 5.1 - CONCLUSÕES

Apesar do caráter ainda incipiente do protótipo de equipamento de ensaio de rampa desenvolvido, a pesquisa apresentada neste trabalho permite algumas conclusões.

Em relação ao equipamento de ensaio de rampa:

- (i) O protótipo tem capacidade de realizar ensaios de rampa, arrancamento e cisalhamento direto utilizando a mesma estrutura;
- (ii) O equipamento de ensaio de rampa 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 de rampa em interfaces solo-solo e solo-rocha

(brita). As duas caixas também podem ser aproveitadas em ensaios de cisalhamento direto e arrancamento;

(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, a superior com  $1\text{m}^2$  e a inferior com  $1,2\text{m}^2$ , garantem uma área de interface de, no mínimo,  $1\text{m}^2$  em qualquer momento do ensaio e evitam perdas de material, sobretudo os granulares;

(vi) O sistema de confinamento por placas de concreto de  $1\text{m}^2$ , apesar da manipulação trabalhosa, 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 2 medidores de ângulo e 1 *tell tale* mostrou-se adequada, além de oferecer as vantagens de custos reduzidos e simplicidade de operação.

Em relação aos ensaios de rampa das interfaces estudadas:

(i) Os ensaios de repetibilidade forneceram resultados de ângulo de inclinação na ruptura com desvio padrão de  $1,2^\circ$  e coeficiente de variação de 3,8%, indicando a confiabilidade dos resultados de ensaio de rampa;

(ii) Os ensaios de reuso demonstraram a impossibilidade de se utilizar uma mesma interface em vários ensaios;

(iii) Os resultados dos ensaios de rampa apresentados em curvas inclinação de rampa e relação tensão cisalhante/tensão confinante vs deslocamento permitem a determinação direta de todas as variáveis em qualquer momento do ensaio, facilitando a sua interpretação;

(iv) Os resultados de ensaios de rampa da interface solo-solo forneceram parâmetros de resistência comparáveis aos obtidos de ensaios de cisalhamento direto convencionais do solo silto-argiloso. O ângulo de atrito da interface solo-solo e o ângulo de atrito do solo são iguais a  $43,2^\circ$  e  $43,8^\circ$ , respectivamente. A adesão da interface é inferior ao intercepto de coesão do solo, provavelmente devido ao processo de preparação da amostra no ensaio de rampa;

(v) Os ensaios de rampa das interfaces solo-geossintético indicaram parâmetros de resistência consistentes com o tipo do material:  $a = 0,16\text{kPa}$  e  $\phi_{sg} = 41,4^\circ$  para solo-geotêxtil,  $a = 0,22\text{kPa}$  e  $\phi_{sg} = 43,7^\circ$  para solo-geogrelha e  $a = 0,17\text{kPa}$  e  $\phi_{sg} = 35^\circ$  para solo-geomembrana;

(vi) As eficiências de interação em função da adesão e ângulo de atrito da interface calculadas com os parâmetros de resistência de interface solo-solo (obtidos dos ensaios de rampa) são consistentes e comparáveis aos valores reportados na literatura.

O equipamento de rampa encontra-se operacional e seus resultados são coerentes com os reportados na literatura. A campanha de ensaios forneceu resultados de interface para um solo silto-argiloso e três tipos de geossintéticos.

## 5.2 – 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) Realização de ensaios de rampa de interfaces compostas por solos granulares e os mesmos geossintéticos deste estudo para comparação dos mecanismos de resistência;
- (ii) Estudo da resistência de interfaces através de ensaios de rampa utilizando-se diferentes tipos de solo e outros tipos de geossintéticos;
- (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 de rampa através das melhorias do sistema de confinamento e da instrumentação;
- (vi) Habilitação e calibração do equipamento para ensaios de arrancamento e cisalhamento direto de interfaces solo-geossintético;
- (vii) Estudo e comparação dos comportamentos de resistência das interfaces obtidos de ensaios de rampa, arrancamento e cisalhamento direto.

## 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 12824**: Geotêxteis: Determinação da resistência à tração não confinada em ensaio de faixa larga. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 13359**: Geotêxteis: Determinação da resistência ao puncionamento estático. Rio de Janeiro, 1995.

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.

ATHANASOPOULOS, G.A. Effect of particle size on the mechanical behavior of sand-geotextile composites. **Geotextile and Geomembranes**, vol. 12, p.255-273, 1993.

ATHANASOPOULOS, G. A. Results of Direct Shear Tests on Geotextiles Reinforced Coesive Soil. **Geotextile and Geomembranes** , vol. 14, p.255-273, 1996.

Becker, L.D. **Muro de Solo Reforçado com Geogrelha**, Tese de Mestrado, PUC-Rio – Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2003 (em andamento).

BRIANÇON, L., GIRARD, H., POULAIN, D. Slope stability of lining systems-experimental modeling of frictional at geosynthetic interfaces. **Geotextiles and Geomembranes**. vol. 13 (5), p. 147-172, 2002.

BRIANÇON, L., Frictional at geosynthetic interfaces under hydraulic conditions: new inclined plane test procedures and applications. **7<sup>th</sup> Geosynthetics**, p. 1553-1556, 2003.

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.

CHANG, D.T., SUN, T.S. e HUNG, F. Pullout Mechanism of Geogrids under Confinement by Sand and Clayey Soils. **TRANSPORTATION RESEARCH RECORD**, nº 1474, pp. 64-72. Relatório Técnico. New York, 1995.

CHRISTOPHER, B.R.; BERG, R.R. - Pullout Evaluation of Geosynthetics in Cohesive Soils. **Geotextiles, Geomembranes and Related Products**, Ed.: Den Hoedt - A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, v.2, pp. 673-676, 1990.

Cipatex. **Especificações Técnicas da Geomembrana Cipageo**. São Paulo, 2003.

Deutsche Norm. **DIN EN 963**. Geotextiles and geotextiles-related products: Sampling and preparation of test specimens. 1995.

FANNIN, R. J., RAJU, D. M. On the Pullout Resistance of Geosynthetics. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 30, pp. 409-417. 1993.

FARRAG, K., ACAR, Y.B.; JURAN, I. **Pullout Resistance of Geogrids Reinforcements**. Geotextiles and Geomembranes, v. 12, pp. 133-159, 1993.

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.; SPOONER, P.R. Geosynthetic Landfill Cap: Laboratory and Field Tests, design and Construction. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS (EUROGEO 1)**, v. 2, pp. 1039-1046, Maastricht (Netherlands), 1990 .

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**. Ed. De Groot, Den Hoedt e Termaat, Balkema, Rotterdam, pp. 1039-1046, 1996.

Huesker Ltda. **Especificações Técnicas da Geogrelha Fortrac**. São Paulo, 2002.

IGS. **Recommendel Descriptions of Geosynthetics. Functions, Geosynthetics Terminology, Mathematical and Graphical Symbols**. Agosto 2000.

INGOLD, T.S. A Laboratory investigation of soil-geotextile friction. **Ground Engineering**, pp. 21-28, 1984.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 12957**: 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 University, Ankara, Turkey, 1997.

IZGIN, M. e WASTI, Y. Geomembrane-Sand Interface Frictional Properties as Determined by Inclined Board and Shear Box Tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, pp.207-219, 1998.

JEWELL, R.A.; WROTH, C.P. Direct Shear Test On Reinforced Sand. **Geotechnique**, v. 37, pp. 53-68, 1987.

JEWELL, R.A., Reinforcement Bond Capacity. **Geotechnique**, v.40, n.3, pp. 513-518,1990.

JURAN, I; CHEN, C.L. Soil-geotextile pullout interaction properties: testing and interpretation, pp. 37-47. **Transportation Research Record**, 1988 .

KOERNER, R.M. (1998) **Designing with Geosynthetics**. New Jersey: Prentice-Hall, 761p.

KOERNER, R.M., MARTIN, J.P., KOERNER, G.R. Shear Strength Parameters Geomembranes and Cohesive Soils. **Geotextiles and Geomembranes**, V.4, pp. 21-30, 1986.

KOUTSOURAIS M., SANDRI, D., SWAN, R. Soil Interaction Characteristics of Geotextiles and Geogrids. **6<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics**, pp. 739-744, 1998.

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, M.L ; LADEIRA, M. Influence of the Confinement, Soil Density and displacement Ratio on Soil – Geogrid Interaction. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 14, n.10, pp. 543-554, 1996.

LOPES, C.P.F.C. **Estudo de Interação Solo-Geossintético através de Ensaio de Corte em Plano Inclinado**. 186p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto (Portugal), Cidade do Porto, 2001.

MELLO, L.G.R., LIMA Jr., N.R., PALMEIRA, E.M. Estudo da Interação entre Interfaces de Solo e Geossintético em Taludes de Áreas de Disposição de Resíduos. **Solos e Rochas**, V.26 (1), pp.19-352, 2003.

MIYATA, K. Walls Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Geogrid in Japan. **Geosynthetics International**, v. 3, pp. 1-11, 1996.

NAKAMURA, T.; MITACHI, T.; IKEURA, I. Direct Shear Test Method as a means for estimating geogrid-sand interface shear-displacement behavior. **Soils and Foundations**, v.39. n.4, pp.1-8, 1999.

NAREJO, D.B. A simple tilt table device to measure index frictional angle of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, V.21, pp.49-57, 2003.

Ober S.A Indústria e Comércio. **Especificações Técnicas do Geotêxtil Geofort**. São Paulo, 1999.

PALMEIRA, E.M. **The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory test**. Tese de Doutorado. Magdalen College, Oxford, 238p, 1987.

PALMEIRA, E.M., MILLIGAN, G. W. E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand, **Geotechnique**, n. 3, p. 18-30, 1989.

PALMEIRA, E.M. Execução e interpretação de ensaios de laboratório em geossintéticos. In: **SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DE GEOSINTÉTICOS**, Rio de Janeiro, pp. 87-108, 1999.

PALMEIRA, E.M.; LIMA JÚNIOR, N.R.; MELLO, L.G.R. Interaction between soils and geosynthetic layers in large scale ramp tests. **Geosynthetics International**, v.9, n.2, 2002.

SAEZ, J. A. Caracterización geomecánica de geotextiles. In: **Curso sobre técnicas generales de refuerzo del terreno y sus aplicaciones**. CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX), vol.1, pp. 1-29, Madrid, 1997.

SAYÃO, A. S. F. J.; TEIXEIRA, M. L. Utilização de geossintéticos para reforço de aterros sobre solos moles. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE GEOSINTÉTICOS**, São Paulo:, pp. 169-180, 1995.

SIEIRA, A.C.C.F.; SAYÃO, A.S.F.J.; SOPEÑA, L. Estudio de los Mecanismos de Interacción Suelo-Geomalla en Equipos de Grandes Dimensiones. II **SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOSINTÉTICOS**, Madrid, España, p.173-184, 2002.

SIEIRA, A.C.C.F. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo Geogrelha**. Tese de Doutorado – PUC-Rio, 330p, Rio de Janeiro, 2003.

TEIXEIRA, S. H. C. **Construção e calibração de um equipamento de ensaios de arrancamento de geossintéticos**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, USP- São Carlos, 157p, 1999.

VIANA, H.N.L., PALMEIRA, E.M. Reforço de camadas de solo de cobertura de taludes de obras de disposição de resíduos com utilização de geogrelhas. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS**, Porto Alegre, 2003.

WASTI, Y. ÖZDÜZGÜN, Z.B. Geomembrane-geotextiles interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests. **Geotextiles and Geomembranes**, vol 19. pp-45-57, 2001.

