

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Alessandra Tavares de Castro

**Ensaio de Rampa e de Cisalhamento
Direto em Interfaces Solo-Geossintético**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

Rio de Janeiro, abril de 2008

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



Alessandra Tavares de Castro

**Ensaaios de Rampa e de Cisalhamento
Direto em Interfaces Solo-Geossintético**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Co-orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro

Abril de 2008



Alessandra Tavares de Castro

**Ensaio de Rampa e de Cisalhamento
Direto em Interfaces Solo-Geossintético**

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

Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Co-orientador

COPPE/UFRJ

Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Marcio de Souza S. de Almeida

COPPE/UFRJ

Paulo César de Almeida Maia

UENF

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação
do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Abril de 2008

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

Alessandra Tavares de Castro

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, em 2005. Realizou estágio de pesquisa no Laboratório de Mecânica dos Solos - auxiliando em projetos de pesquisa de geotecnia, entre 2003-2005. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil (Geotecnia) em 2005. Publicou artigo técnico sobre o assunto em congresso nacional. É Engenheira Civil da Construtora Norberto Odebrecht S.A.

Ficha Catalográfica

Castro, Alessandra Tavares de

Ensaio de Rampa e de Cisalhamento Direto em Interfaces Solo-Geossintético / Alessandra Tavares de Castro; orientador: Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão; co-orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2008.

119 f.; 30 cm

1. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas

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

CDD: 624

Dedico esta dissertação aos meus amados pais,
Dulce e Idemar e minha irmã Adriana

Agradecimentos

A Deus, minha luz e proteção.

Aos meus amados pais, Dulce e Idemar, pela educação e confiança.

À minha irmã querida, Adriana, pelo amor e carinho.

Ao meu amor Felipe pela força incondicional.

A todos os meus professores pela doação e ensinamentos, em especial à professora Christianne de Lyra Nogueira pela amizade, carinho e motivação.

Ao Prof^o. Sayão e à Prof^a Anna Laura, meus orientadores, pela oportunidade e simpática amizade.

Aos saudosos amigos de Minas Gerais.

À Construtora Norberto Odebrecht S.A. pela prática da boa engenharia.

Aos amigos que o Rio de Janeiro me deu, em especial ao Vini, pela parceria, aprendizado, orientação e amizade eterna e à minha irmã curitibana Amanda.

À PUC-Rio, à secretária Rita de Cássia e ao Laboratório de Estruturas pela acolhida e apoio.

À Huesker, pelo apoio ao projeto de pesquisa.

Ao CNPq pelo indispensável apoio financeiro.

Resumo

Castro, Alessandra Tavares de; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim.
Ensaio de Rampa e de Cisalhamento Direto em Interfaces Solo-Geossintético. Rio de Janeiro, 2008. 119p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A aplicação de geossintéticos em obras geotécnicas vem crescendo intensamente nos últimos tempos, tornando cada vez mais importantes e necessários os estudos da resistência de interface para aplicação em projetos e obras. Em particular, tais estudos devem tratar das técnicas de ensaios de campo e de laboratório para a obtenção dos parâmetros de resistência (adesão e ângulo de atrito). Os ensaios de laboratório são utilizados com maior frequência por serem mais acessíveis e de fácil execução. Os ensaios de campo reproduzem mais diretamente as condições das obras, mas apresentam como desvantagem o custo elevado e a dificuldade de execução. Este trabalho tem como finalidades apresentar o equipamento de ensaio utilizado e analisar os resultados de um programa em interfaces solo-geossintético. O programa experimental envolveu ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e cisalhamento direto inclinado em solo com granulação grosseira (brita), em contacto com as geomembranas e as geogrelhas. Os resultados foram analisados avaliando-se as influências da tensão confinante e da inserção dos geossintéticos, e comparando-se os diferentes tipos de materiais e de técnicas de ensaio. A influência da tensão confinante foi estudada com base em três tensões confinantes distintas, de baixa magnitude (1,0; 1,7 e 2,4kPa). O aumento da tensão confinante implicou em um aumento, tanto do deslocamento até a ruptura quanto da resistência da interface. Este comportamento deve-se à possibilidade de rearranjo e imbricamento entre os grãos da brita. Em relação ao tipo de geossintético, a interface brita-geogrelha apresentou maior resistência do que a interface brita-geomembrana. Isto pode ser explicado em função da estrutura do geossintético, pois a geomembrana perde possui uma superfície lisa, o que favorece o deslizamento, ao contrário da

geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo nas aberturas da malha.

Palavras-Chave

Geossintéticos; geogrelha; geomembrana; ensaios de laboratório; iteration mechanism; ensaios de rampa; ensaios de cisalhamento direto.

Abstract

Castro, Alessandra Tavares de; Sayão, Alberto de Sampaio Ferraz Jardim. **Tilt Tests and Direct Shear on Soil-Geosynthetic Interfaces**. Rio de Janeiro, 2008. 119p. MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of geosynthetics in geotechnical construction is growing up intensively on the last years, which make the study on interface strength more important and necessary to its application on projects and construction.

Particularly, these studies should watch out field and laboratory tests in order to obtain strength parameters (adhesion and friction angle). Laboratory tests are more frequently used, due to their accessibility and easy execution. Field tests reproduce construction condition in a directly way, but have as disadvantages high cost and hard execution condition.

The current research have as objectives present the test equipment used and analyze software results obtained for soil and geosynthetic interfaces. The experimental program involved ramp tests, conventional direct shear test and inclined direct shear test. This program was carried out on gravel soil in contact with two different types of geosynthetics (geomembrane and geogrids).

Results were analyzed based on the influence of confining pressure and the introduction of geosynthetics, and comparing the different materials and test techniques. The confining pressure influence/importance was studied based on three different low magnitude confining pressures (1,0; 1,7 e 2,4kPa). The confining pressure increases resulted in an increase of both displacements until the failure and interface strength. This behavior could be explained due to the possibility of interlocking e between the gravel grains.

Considering the geosynthetic type, gravel-geogrid interface presented higher strength than gravel- geomembrane interface. This could be explained by the structure of the geosynthetic; geomembrane has low strength due to its smooth surface, which benefits the slide. Geogrid instead, counts with the soil interlocking; effects in the mesh holes.

Keywords

Geosynthetics, geogrid; geomembrane; laboratory test; mecanismos de interação; ramp test; direct shear test.

Sumário

1	Introdução	23
1.1.	Considerações Iniciais	23
1.2.	Motivação e Objetivos	24
1.3.	Escopo da Dissertação	24
2	Revisão Bibliográfica	25
2.1.1.	Considerações Iniciais	25
2.1.2.	Geossintéticos	26
2.1.3.	Geogrelhas	28
2.1.4.	Geomembranas	30
2.1.5.	Propriedades dos Geossintéticos	30
2.1.6.	Propriedades Físicas	31
2.1.7.	Propriedades Mecânicas	32
2.2.	Mobilização da Resistência da interface Solo-Geossintético	34
2.3.	Avaliação da Resistência da interface Solo-Geossintético	35
2.4.	Ensaio para avaliação da Resistência da Interface Solo - Geossintético	36
2.4.1.	Ensaio de Cisalhamento Direto	37
2.4.2.	Ensaio de Rampa	43
2.5.	Considerações Finais	61
3	Programa Experimental	62
3.1.	Considerações Iniciais	62
3.2.	Materiais Utilizados	62
3.2.1.	Solo	62
3.2.2.	Geossintéticos	65
3.3.	Preparação dos Corpos de Prova	66
3.4.	Equipamento	69

3.5. Metodologia de Ensaio	71
3.5.1. Ensaio de Rampa	71
3.5.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	71
3.5.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado	72
3.6. Programa de Ensaios	72
4 Análise dos Resultados	74
4.1. Considerações Iniciais	74
4.2. Metodologia de Análise de Resultados	74
4.3. Apresentação dos Resultados	77
4.4. Ensaio de Rampa – RP	78
4.4.1. Influência da Tensão Confinante	78
4.4.2. Influência do Geossintético	83
4.4.3. Eficiência	85
4.5. Ensaio Cisalhamento Direto Convencional – CC	86
4.5.1. Influência da Tensão Confinante	86
4.5.2. Influência do Tipo Geossintético	90
4.5.3. Eficiência das Interfaces	93
4.6. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a 4,5° – (CI-4,5)	93
4.6.1. Influência da Tensão Confinante	93
4.7. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a 9,0° – (CI-9,0)	95
4.7.1. Influência da Tensão Confinante	95
4.7.2. Influência do Geossintético	100
4.7.3. Eficiência das Interfaces	102
4.8. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a 18,0° – (CI-18,0)	102
4.8.1. Influência da Tensão Confinante	102
4.8.2. Eficiência da Interface	106
4.9. Comparação dos Ensaios de Interface	106
4.9.1. Interface Solo-Solo	106
4.9.2. Interface Solo-Geogrelha	107
4.9.3. Interface Solo-Geomembrana	108
4.10. Considerações Finais	110
5 Conclusões	112

5.1. Sugestões para Pesquisas Futuras	113
6 Referências Bibliográficas	115

Lista de Figuras

Figura 1 - Geogrelha tecida de poliéster revestida com PVC (Maccaferri)	29
Figura 2 – Geomembrana de Pead lisa nas duas faces (Nortene)	30
Figura 3 - Resultados de ensaios de tração em faixa larga (a) e grab test (b)	33
Figura 4 - Modos de interação solo-geossintético (Aguiar, 2003)	34
Figura 5 - Efeito da montagem do Ensaio de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)	38
Figura 6 - Efeito das Dimensões do Equipamento de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)	40
Figura 7 - Influência da espessura de solo da caixa superior na interface areia-geotêxtil em ensaios de cisalhamento direto (Gourc et al., 1996)	41
Figura 8 - Sistema de Interação Solo Geossintético no Equipamento de cisalhamento direto (Sieira, 2000)	42
Figura 9 - Esquema de talude de disposição de resíduos com sistemas de multicamadas de geossintéticos (Adaptado Mello et al., 2003)	44
Figura 10 - Conjunto de forças do ensaio de rampa (Rezende, 2005)	45
Figura 11 - Variação da distribuição da tensão normal com a inclinação da rampa: (a) condição inicial e (b) durante o ensaio (Rezende, 2005)	46
Figura 12 - Influência da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}) (Wasti e Özduzgun, 2001)	48
Figura 13 - Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado: (a) Inclinação de 15° e (b) Inclinação de 25° (Mello et al. 2003)	49
Figura 14 - Equipamento da Universidade do Porto (Lopes, 2001)	51
Figura 15 - Deslocamentos medidos em duas interfaces na rampa (Modificado – Girard et al., 1994)	54

Figura 16 - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido; (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001)	55
Figura 17 - Situação típica em um talude reforçado com geossintéticos	57
Figura 18 - Estrutura principal do equipamento desenvolvido por Aguiar (2003)	59
Figura 19 - Sistema de monitoramento dos deslocamentos (Rezende,2005)	60
Figura 20 - Sistema de fixação do geossintético (Rezende,2005)	60
Figura 21 - Equipamento de Rampa da PUC-Rio (Aguiar, 2003)	61
Figura 22 - Amostra representativa da brita ensaiada	63
Figura 23 - Curva Granulométrica da Brita	63
Figura 24 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	64
Figura 25 - Amostra representativa da Geogrelha (GG) ensaiada	65
Figura 26 - Amostra representativa da Geomembrana (GM) ensaiada	66
Figura 27 - Preparação do corpo de prova	67
Figura 28 - Conclusão da preparação do corpo de prova para o ensaio de rampa (tensão confinante intermediária)	68
Figura 29 - Acessórios utilizados apenas para os ensaios: cisalhamento direto e inclinado	69
Figura 30 - Configuração para ensaio de Rampa (Aguiar, 2008)	70
Figura 31 - Configuração para ensaios de Cisalhamento Direto e Inclinado (Aguiar, 2008)	70
Figura 32 - Ensaio de rampa após a ruptura	71
Figura 33 - Plataforma durante o ensaio de cisalhamento direto inclinado	72
Figura 34 - Esquema de forças do Ensaio de Rampa. (Aguiar, 2003)	75
Figura 35 - Esquema de forças do Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado. (Aguiar, 2008)	76
Figura 36 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-BR. Ensaio de RP	79
Figura 37 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio de RP	80
Figura 38 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GG. Ensaio de RP	81

Figura 39 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio de Rampa	81
Figura 40 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GM. Ensaio de RP	82
Figura 41 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio de RP	83
Figura 42 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR;BR-GG e BR-GM ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio de RP	84
Figura 43 - Envoltórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio RP	85
Figura 44 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-BR. Ensaio CC	87
Figura 45 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio CC	87
Figura 46 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GG. Ensaio CC	88
Figura 47 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CC.	89
Figura 48 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GM. Ensaio CC	90
Figura 49 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio Cisalhamento Direto	90
Figura 50 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR;BR-GG e BR-GM ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio CC	92
Figura 51 - Envoltórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio CC	92
Figura 52 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GM. Ensaio CI-4,5	94
Figura 53 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio CI-4,5	95
Figura 54 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-BR. Ensaio CI-9,0	96
Figura 55 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GG. Ensaio CI-9,0	97
Figura 56 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CI-9,0	98
Figura 57 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GM. Ensaio CI-9,0	99

Figura 58 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio CI-9,0 99	
Figura 59 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR;BR-GG e BR-GM. ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio CI-9,0	101
Figura 60 - Envoltórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio CI-9,0	101
Figura 61 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR. Ensaio CI-18,0	103
Figura 62 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio CI -18,0104	
Figura 63 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-GG. Ensaio CI-18,0	105
Figura 64 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CI-18,0105	
Figura 65 - Envoltórias de resistência da interface BR-BR. Ensaios de RP, CC, CI-9,0 e CI-18	107
Figura 66 - Envoltórias de resistência da interface BR-GG. Ensaios de RP, CC, CI (9,0°) e CI (18°)	108
Figura 67 - Envoltórias de resistência da interface BR-GM. Ensaios de RP, CC, CI-4,5 e CI-9,0	109

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais aplicações dos geossintéticos (Vertematti, 2004)	27
Tabela 2 - Tipos de geossintéticos e suas principais aplicações (Vertematti, 2004)	28
Tabela 3 - Influência da granulometria e da angularidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)	43
Tabela 4 - Influência da tensão de confinamento no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001)	48
Tabela 5 - Influência do tipo de geossintético nos resultados dos ensaios de rampa (Aguiar, 2003)	52
Tabela 6 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo- geomembrana para a tensão confinante de 3,2 kPa	53
Tabela 7 - Influência da granulometria do solo nos resultados dos ensaios de rampa (Lopes, 2001)	56
Tabela 8 - Equipamentos de Rampa (Aguiar, 2008)	58
Tabela 9 - Características granulométricas da brita	64
Tabela 10 - Características físicas da brita	64
Tabela 11 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2008)	65
Tabela 12 - Característica da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007)	66
Tabela 13 - Programa de ensaios	73
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Rampa para as interfaces BR-BR79	
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Rampa para a interface BR-GG	80
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de Rampa para as interfaces BR-GM82	
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de Rampa para interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM	84
Tabela 18 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de Rampa	85

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Convencional para a interface BR-BR	86
Tabela 20 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GG	88
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GM	89
Tabela 22 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Convencional ara as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM	91
Tabela 23 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	93
Tabela 24 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto (4,5°) para interface BR-GM	94
Tabela 25 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (9,0°) para a interface BR-BR	96
Tabela 26 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GG	97
Tabela 27 - Resultados dos ensaios CI-9,0 para a interface BR-GM	98
Tabela 28 - Resultados dos ensaios CI-9,0 para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM	100
Tabela 29 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio CI-9,0	102
Tabela 30 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (18,0°) para a interface BR-BR	103
Tabela 31 - Resultados dos ensaios CI-18,0 para a interface BR-GG	104
Tabela 32 - Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de CI-18,0	106
Tabela 33 - Resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18,0 para a interface BR-BR	107
Tabela 34 - Resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18,0 para a interface BR-GG	108
Tabela 35 - Resultados comparativos entre uma mesma interface submetidos aos diferentes ensaios	109

Lista de Símbolos e Abreviações

a	Adesão solo-geossintético
A	Área de contato entre o solo e o geossintético
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BR	Brita
C	Carga aplicada à plataforma
c	Coesão
CC	Ensaio de Cisalhamento direto convencional
CI-4,5	Ensaio de Cisalhamento direto inclinado à 4,5°
CI-9,0	Ensaio de Cisalhamento direto inclinado à 9,0°
CI-18,0	Ensaio de Cisalhamento direto inclinado à 18,0°
Cc	Coefficiente de curvatura
Cu	Coefficiente de uniformidade
D ₅₀	Diâmetro médio da partícula de solo
D _{máx}	Diâmetro máximo da partícula de solo
D _r	Densidade relativa da partícula de solo
e	Índice de vazios do solo
e _{máx}	Índice de vazios máximo do solo
e _{mín}	Índice de vazios mínimo do solo
e _{Dr=15%}	Índice de vazios referente à Dr = 15% do solo
E _c	Eficiência da interface (parcela da adesão)
E _φ	Eficiência da interface (parcela do atrito)
F	Componente tangencial do peso da caixa superior
f	Coefficiente de aderência (análogo à E _φ)
GG	Geogrelha
GGB	Geogrelha soldada
GGE	Geogrelha extrudada
GGW	Geogrelha tecido
GM	Geomembrana

GMR	Geomembrana reforçada
GMT	Geomembrana texturizada
h	Altura da amostra de solo
IGS	International Geosynthetics Society
L	Comprimento da base da amostra de solo
M	Massa depositada na plataforma
N	Força confinante vertical
NBR	Norma Brasileira
P	Força vertical confinante
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
PVC	Policloreto de Vinila
Q	Peso da caixa superior
RP	Ensaio de rampa
T	Componente tangencial do peso da caixa superior
W	Peso da amostra
x	Braço de alavanca
α	Ângulo de rampa
α_{rup}	Ângulo de rampa na ruptura
δ	Deslocamento da caixa de ensaio
δ_{rup}	Deslocamento da caixa de ensaio na ruptura
μ_A	Gramatura
t_{GT}	Espessura nominal
n_{GT}	Porosidade
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo
ϕ_{sec}	Ângulo de atrito secante
ϕ_{sg}	Ângulo de atrito da interface
λ	Coeficiente de aderência (análogo à E_c)
ρ_f	Massa específica da fibra

ρ_w	Massa específica da água
σ	Tensão normal na interface
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão normal máxima
$\sigma_{\text{mín}}$	Tensão normal mínimo
σ_n	Tensão normal inicial na interface
σ_{rup}	Tensão normal na ruptura
σ_t	Resistência à tração
γ	Peso específico do solo
$\gamma_{\text{máx}}$	Peso específico máximo
$\gamma_{\text{mín}}$	Peso específico mínimo
τ	Tensão cisalhante na interface
τ_{rup}	Tensão cisalhante na ruptura

1 Introdução

1.1. Considerações Iniciais

A aplicação de geossintéticos em obras geotécnicas vem crescendo intensamente nos últimos tempos, tornando cada vez mais importantes e necessários os estudos da resistência de interface para aplicação em projetos e obras. Em particular, tais devem tratar das técnicas de ensaios de campo e laboratório para a obtenção dos parâmetros de resistência, representados pelo coeficiente de adesão (α) e ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}). Usualmente são utilizados ensaios de campo e laboratório para a obtenção destes parâmetros.

Os ensaios de laboratório são utilizados com maior frequência por serem mais acessíveis e de fácil execução. Os ensaios mais utilizados são o de cisalhamento direto, o de rampa, o de arrancamento e mais recentemente o ensaio de cisalhamento direto inclinado.

Os ensaios de campo reproduzem mais diretamente as condições das obras, mas apresentam como desvantagem o custo elevado e a dificuldade de execução.

A escolha do tipo de ensaio depende do tipo de movimento relativo entre a massa de solo e o geossintético. Se o geossintético permanecer solidário à 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 deslocar em relação à massa de solo e a resistência for mobilizada por este movimento, o ensaio mais adequado é o de arrancamento. Nos casos em que a resistência é mobilizada pelo deslocamento da massa superior de solo em relação ao geossintético, que permanece solidário à massa de solo, o ensaio característico é o ensaio de rampa.

Ressalta-se que, quando o geossintético atua como reforço numa obra geotécnica, é fundamental que este atenda satisfatoriamente aos seguintes requisitos: elevada resistência à tração, elevado módulo de deformação, baixa susceptibilidade à fluência, elevado grau de interação com o solo envolvente e

durabilidade compatível com a vida da obra. Cada requisito pode ter maior ou menor relevância em função das características da obra (Sieira, 2003).

1.2. Motivação e Objetivos

O presente trabalho visa ampliar a compreensão dos mecanismos de interação da interface solo-geossintético, a partir dos resultados dos ensaios de laboratório: rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado. Bem como, investigar os principais fatores que influenciam os resultados obtidos. O programa de ensaio colaborou para habilitar o equipamento desenvolvido por Aguiar, 2008.

1.3. Escopo da Dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Neste presente capítulo descreve-se uma breve introdução ao tema da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta através de uma revisão bibliográfica o conceito, a aplicação e as propriedades dos geossintéticos. Aborda também a mobilização e a avaliação da resistência da interface solo-geossintético e discute os diferentes tipos de ensaios e os fatores que influenciaram nos resultados.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização do solo e dos geossintéticos utilizados, as metodologias de preparação dos corpos de prova, o programa experimental e os procedimentos de ensaio.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos ensaios e analisa os fatores que os influenciam, tais como, a tensão confinante, o tipo de geossintético e o tipo de ensaio.

O Capítulo 5 resume as principais considerações finais deste trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras sobre os diferentes ensaios em interfaces solo-geossintéticos.

2 Revisão Bibliográfica

2.1.1. Considerações Iniciais

A inserção de materiais alternativos nos solos, como forma de melhoria da resistência, vem crescendo mundialmente, nas últimas décadas. Os geossintéticos, em particular, vêm sendo cada vez mais utilizados nas obras geotécnicas, principalmente em sistemas de reforço, controle de erosão, aterros sobre solos moles, drenagem, sistemas de impermeabilização, dentre outros. Devido a este crescente aumento, tornam-se cada vez mais importante o estudo do comportamento destes materiais quando inseridos na massa de solo, ou seja, do mecanismo de interação entre solo e geossintético.

O mecanismo de interação entre solo e geossintético é complexo, sendo função das propriedades dos materiais envolvidos e expresso em termos de resistência, pelos parâmetros de adesão (a) e ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}).

Os parâmetros de interface podem ser obtidos através de ensaios de campo e laboratório. Os ensaios de campo têm a vantagem de representar mais corretamente as solicitações *in situ*, entretanto, possuem custo elevado e apresentam difícil execução. Já os ensaios de laboratório têm custo mais acessível, porém apresentam inconvenientes, como tamanho de amostras reduzido.

Este capítulo aborda as principais características dos geossintéticos disponíveis no mercado, em especial, geogrelhas e geomembranas que foram utilizadas nos ensaios desta presente pesquisa, para determinação da resistência da interface solo-geossintético. Apresenta também a descrição dos ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado, bem como a influência das condições de contorno.

2.1.2. Geossintéticos

A Sociedade Internacional de Geossintéticos, IGS, define os geossintéticos como materiais planos, poliméricos (sintéticos ou naturais) utilizados em combinação com o solo, rocha e/ou outros materiais geotécnicos na engenharia.

Os geossintéticos são constituídos em sua maioria por polímeros e em menor escala por aditivos. O termo polímero foi criado em 1933 pelo sueco Jöns Jakob Berzelius, sendo resultante do encadeamento de átomos de carbono, formando uma cadeia carbônica associada ou não a grupos funcionais, estruturados à partir de pequenas unidades de repetição denominadas monômeros, e de grupos de ponta, que são pequenas unidades que finalizaram a cadeia polimérica (Bueno, 2004).

Os primeiros geossintéticos a serem utilizados foram os geotêxteis tecidos na década de 50, nos EUA, na antiga Alemanha Ocidental e no Japão. Foram empregados como reforço de subleitos de pavimentos de rodovias, elementos de drenagem em muros de concreto para controlar a erosão marítima, e como elemento de separação em “rip-raps”, respectivamente.

Na década de 60, ocorreu a primeira aplicação de geotêxtil não-tecido de fibras em recapeamento asfáltico e controle de erosão. No Japão, em 1966, foram utilizadas as georredes como reforço de aterro de solos moles, o que levou a criação das geogrelhas.

Na década de 70 iniciaram-se as construções de grandes barragens, com cerca de 80m de altura, com inúmeras aplicações de geotêxtil no sistema drenante-filtrante, como no caso da Hans Stridjon Dam, na África do Sul, e da Frauenau Dam, na Alemanha. Em 1977 a França sediou o primeiro encontro (International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics) onde os termos geotêxtil e geomembrana foram propostos pelo professor Jean Pierre Giroud.

No Brasil, os geossintéticos vêm sendo empregados desde a década de 70. Em 1971 ocorreram as primeiras aplicações de obras rodoviárias, como é o caso da BR-101, em Angra dos Reis (RJ) e na rodovia Transamazônica. Em 1975 os geossintéticos começaram a ser aplicados em obras de drenagem profunda, enrocamentos marítimos e barragens de terra. Na década de 80, os primeiros geotêxteis tecidos foram fabricados e as primeiras obras de porte de solo

reforçado com geotêxtil na rodovia que liga Taubaté a Campos do Jordão foram executadas. Em 1982 ocorre a primeira aplicação de geomembrana nacional de PVC.

As funções desempenhadas pelos geossintéticos são as mais variadas e de acordo com a norma brasileira NBR 12.553 as principais são: controle de erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, reforço e separação (Tabela 1). Para cada uma destas aplicações existe um, ou mais de um, geossintéticos recomendados (Tabela 2).

Os exemplos de geossintéticos são: geobarra, geocélula, geocomposto, geoespaçador, geoexpandido, geoforma, geogrelha, geomanta, geotêxtil, geotira, geotubo, dentre outros. Muitos dos novos geossintéticos ainda não foram classificados como os geocompostos para recapeamento asfáltico e para filtração, não sendo apresentados na Tabela 1.

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

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

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

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

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

Dentre os geossintéticos citados será dada ênfase à descrição da geogrelha e geomembrana, pois foram os utilizados nesta pesquisa.

2.1.3. Geogrelhas

As geogrelhas [GG] são estruturas regulares planas em forma de grelha, que possuem os orifícios maiores que a área dos elementos que a constituem. A existência de tais aberturas promove o inter-travamento do solo nas mesmas, como mostra a Figura 1. É considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas (NBR 12553).

A geogrelha extrudada [GGE] é obtida através de processo de extrusão, geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, e recobertos por um

revestimento protetor (IGS, 2000). O estiramento, que pode ser em um único sentido formando geogrelhas unidirecionais ou nos dois sentidos formando geogrelhas bidirecionais.

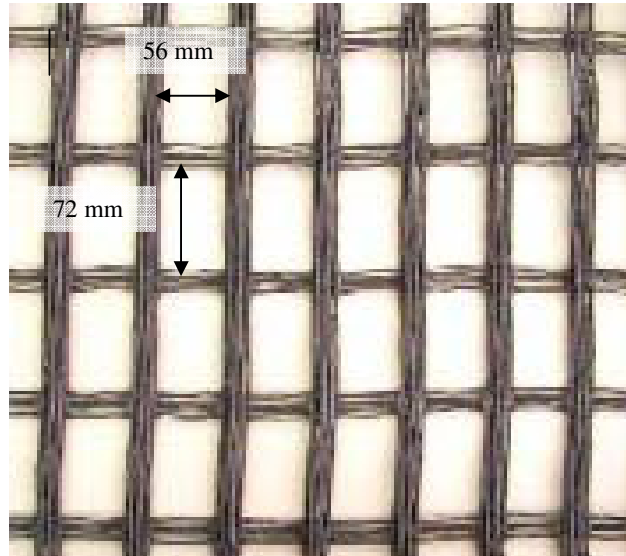


Figura 1 - Geogrelha tecida de poliéster revestida com PVC (Maccaferri)

A geogrelha soldada [GGB] é composta por elementos de tração longitudinais e transversais, soldados nas juntas, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, recobertos por um revestimento protetor.

A geogrelha tecida [GGW] é composta por elementos de tração longitudinais e transversais, tricotados ou inter-tecidos nas juntas.

Os polímeros normalmente empregados na fabricação de geogrelhas são o polietileno de alta densidade (PEAD), o poliéster (PET) e o polipropileno (PP).

Podem ser rígidas ou flexíveis, e seu emprego é quase que exclusivamente, para reforço, embora sejam utilizadas também como elemento de separação e proteção superficial.

As primeiras geogrelhas foram fabricadas na Inglaterra pela Netlon e levadas para o EUA em 1982 pela Tensar. Estas podem ser produzidas através da perfuração de chapas, as quais são posteriormente tensionadas em uma ou duas direções, com o objetivo de melhorar as suas propriedades físicas. Em geral, as geogrelhas resultantes deste processo de fabricação apresentam aberturas variando de 1 a 10 cm, na forma de elipse, retângulo com cantos arredondados ou quadrados.

2.1.4. Geomembranas

Geomembrana [GM] é um produto bidimensional de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação (NBR 12553). As geomembranas podem ser reforçadas e/ou texturizadas. Na geomembrana reforçada [GMR] a armadura de reforço é incorporada ao produto, formando um conjunto monolítico. Já a geomembrana texturizada [GMT], possui acabamento superficial com função de aumentar as características de atrito de interface.

As geomembranas são fabricadas a partir de diferentes polímeros básicos, em várias espessuras, com superfícies lisas ou rugosas. Em função dessas características, algumas propriedades como a espessura e a resistência à tração, por exemplo, podem requerer diferentes formas de determinação, de acordo com diferentes normas técnicas. A Figura 2 mostra um exemplo típico de geomembrana.

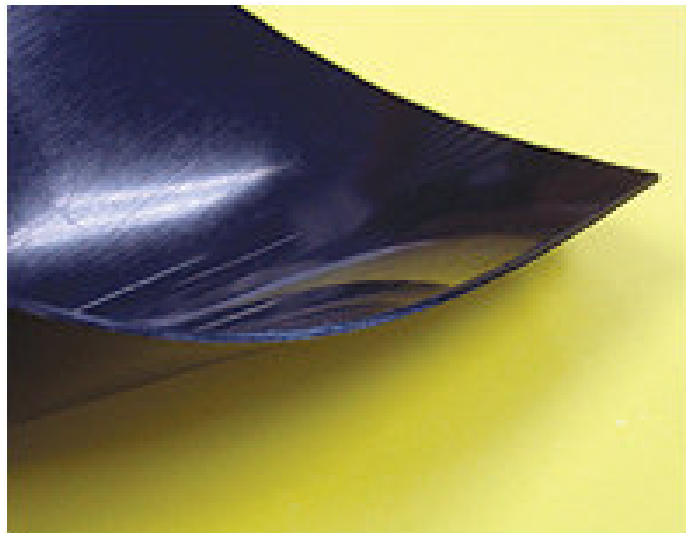


Figura 2 – Geomembrana de Pead lisa nas duas faces (Nortene)

2.1.5. Propriedades dos Geossintéticos

A seleção dos geossintéticos deve atender às propriedades fundamentais do ambiente específico que será instalado e exposto, traduzindo as condições técnicas

a que serão submetidos. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios de campo ou, mais comumente, de laboratório, os quais, para serem realistas, precisam reproduzir os aspectos importantes da interação do geossintético com o meio em que será inserido. Além disto, devem apresentar vida útil compatível com as das obras onde serão empregadas.

O comportamento do geossintético se deve aos seus componentes polímeros básicos e aditivos, e ao processo que foi fabricado. A identificação das matérias-primas empregadas na confecção dos geossintéticos pode permitir inferir sobre possível degradação e envelhecimento precoce do material em contato com os vários produtos e agentes do meio, garantindo a qualidade do produto e sua instalação. Essa identificação é feita através dos ensaios de laboratório que podem ser divididos em duas categorias: os que determinam as propriedades físicas e aqueles que determinam as propriedades mecânicas.

2.1.6. Propriedades Físicas

As propriedades físicas dos geossintéticos estão diretamente ligadas às propriedades dos polímeros que os compõem, ao modo de fabricação dos filamentos ou fibras e da estrutura do produto. As propriedades físicas de maior interesse na caracterização são massa por unidade de área ou gramatura (μ_A), espessura nominal (t_{GT}), porosidade (n_{GT}) e distribuição e dimensão das aberturas. Estas não indicam diretamente parâmetros de comportamento, mas auxiliam em identificações no campo.

A gramatura (g/m^2) é a relação entre a massa e a área de um corpo de prova de geometria regular, que não deve ser utilizada isoladamente como propriedade de especificação, pois, dependendo dos processos de fabricação, produtos com a mesma gramatura podem apresentar propriedades mecânicas e hidráulicas diferentes. Os valores usuais da gramatura variam entre 100 a 900 g/m^2 . Para os geotêxteis tecidos os valores variam de 100 a 300 g/m^2 , para os não tecidos varia de 100 a 400 g/m^2 , e entre 200 a 1000 g/m^2 para geogrelhas.

A espessura nominal (mm) é obtida medindo-se a distância interna entre duas placas rígidas submetida a uma pressão de 2 kPa.

Porosidade (%) é a relação entre o volume de poros e o volume total da amostra, expressa pela Equação 1, que relaciona a gramatura (μ_A), a massa específica da fibra ou do filamento que constitui o geotêxtil (ρ_f) e a massa específica da água (ρ_w).

$$n_{GT} = \left(1 - \frac{\mu_A}{t_{GT} \cdot \rho_f \cdot \rho_w} \right) \times 100\% \quad (1)$$

A distribuição e dimensão das aberturas são fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros e separadores. Os geotêxteis, tecidos ou não-tecidos, possuem um intervalo de tamanhos de abertura e não um tamanho único. A representação desse intervalo se assemelha à utilizada para representar a forma granulométrica de um solo. O intervalo varia de 0,06 a 0,15mm para os geotêxteis não tecidos e de 0,05 a 1,50mm para os geotêxteis tecidos (Aguiar, 2003).

2.1.7. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos geossintéticos referem-se à resistência do material quando submetido a um carregamento e a deformação por ele provocado.

A resistência à tração (σ_t) unidirecional é determinada a partir de ensaios que reproduzam as condições de tração no campo (Figura 3a). Uma das extremidades do corpo de prova é fixada a uma máquina de ensaio universal que aplica uma carga de tração crescente, medindo as deformações até a ruptura. As curvas obtidas nos ensaios, força de tração por unidade de largura versus deformação axial e assim obtêm-se os módulos de rigidez correspondentes. Os ensaios podem ser em tiras ou *GRAB* teste (Figura 3b).

O ensaio em tiras (faixa larga) utiliza corpos de prova de 100mm de comprimento por 200mm de largura, seguindo as normas ISO/EM e ABNT, apresentando essas dimensões os resultados ficam mais próximos do campo.

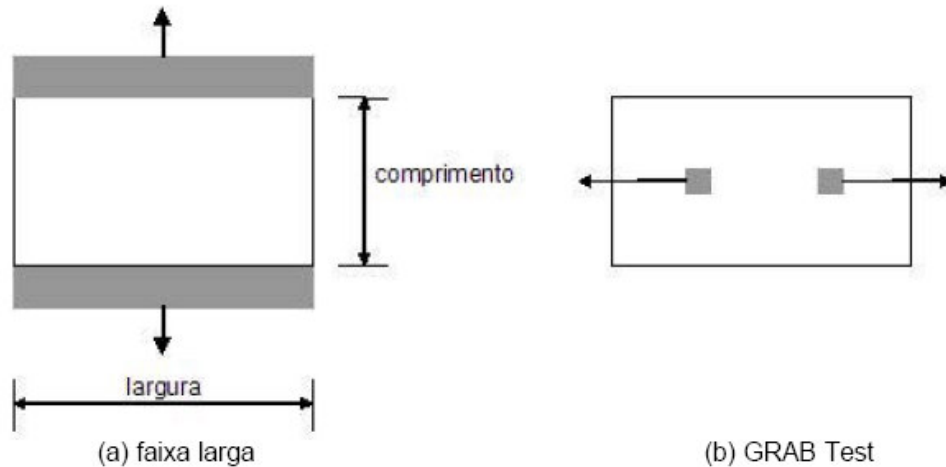


Figura 3 - Resultados de ensaios de tração em faixa larga (a) e grab test (b)

A resistência ao puncionamento é definida como a medição do comportamento dos geossintéticos quando sujeitos às compressões diferenciais ou a choques provocados pela queda de materiais. A quantificação dessa resistência é feita fixando um corpo de prova à borda de um cilindro rígido e submetendo a uma força dinâmica ou estática. O ensaio por puncionamento estático é feito numa máquina universal que aplica uma força vertical crescente na superfície do corpo de prova até sua perfuração, então se mede a força máxima e o deslocamento correspondente. No puncionamento dinâmico o ensaio busca representar o lançamento de materiais granulares sobre o geotêxtil. Um cone padrão cai em queda livre, a 50mm sobre o geossintético, provocando um furo cujo diâmetro é medido por um outro cone padronizado.

A fluência pode acontecer em vários casos de solicitações no campo, como em barreiras bentoníticas (cisalhamento), como em geocompostos drenantes (compressão) ou em estruturas de solo reforçado (tração). A caracterização do material deve ser baseada nas isócronas, que para um pré-determinado tempo, relaciona carga \times deformação e a curva de ruptura por fluência que estabelece tempos de ruptura para os vários níveis de carregamento. Quanto maior a magnitude do carregamento aplicado, maior será a fluência.

2.2. Mobilização da Resistência da interface Solo-Geossintético

O estudo da interação entre solo e reforço é complexo devido à variedade de modos de interação. Os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de campo e de laboratório são de suma importância para o conhecimento acurado da resistência da interface entre solo e o geossintético, sendo a escolha do ensaio mais adequado em função do movimento relativo entre o geossintético e a massa de solo.

Os modos de sollicitações na interface solo-geossintético são atrito na interface (A), tração no reforço (B) e arrancamento (C). A Figura 4 ilustra essas sollicitações, uma seção típica de um muro reforçado.

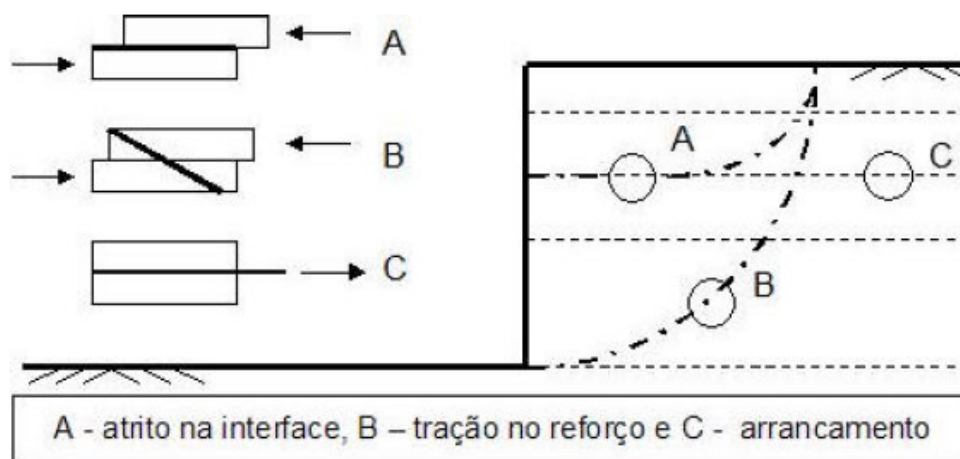


Figura 4 - Modos de interação solo-geossintético (Aguiar, 2003)

A - Atrito na Interface Solo-Reforço: neste tipo de sollicitação a massa superior de solo desloca-se em relação ao geossintético. Essa modelagem solo-geossintético é fundamental para se obter os parâmetros de cisalhamento em caso de deslizamento ao longo da interface e para conhecer a função de transferência de tensões tangenciais entre o reforço e o solo (Auñón, 1997). O ensaio utilizado para este tipo de estudo é o de cisalhamento direto. Verifica-se a formação de planos de ruptura paralelos à direção do reforço à medida que o deslizamento ocorre, a localização destes planos 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; enquanto que, 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 (Gouc e Beech, 1989).

B - Tração no Reforço: a tração no reforço é máxima quando a superfície de ruptura o intercepta. A simulação desse movimento é feita em laboratório, colocando-se o reforço com uma inclinação específica e constante, através do ensaio de cisalhamento direto.

C - Arrancamento: neste movimento, o geossintético se desloca em relação ao solo envolvente, mobilizando a resistência na interface. Os esforços de tração atuantes no geossintético são maiores do que à resistência que o solo oferece ao deslocamento relativo entre ambos. O ensaio utilizado para esta análise é o ensaio de arrancamento.

2.3.

Avaliação da Resistência da interface Solo-Geossintético

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 (ϕ_{sg}). A Equação 2 descreve a resistência de interface.

$$\tau = a + \sigma \tan \phi_{sg} \quad (2)$$

onde:

τ = tensão cisalhante na interface,

a = adesão entre o solo e o reforço,

σ = tensão normal atuante na interface,

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

Os valores de a , ϕ_{sg} e σ podem ser obtidos em termos de tensões totais ou efetivos, dependendo da análise desejada. Os coeficientes de interação entre o solo e o geossintético, λ e f , são expressos através das Equações (3) e (4).

$$\lambda = \frac{a}{c} \quad (3)$$

$$f = \frac{\tan \phi_{sg}}{\tan \phi} \quad (4)$$

c = adesão entre os solos

ϕ = ângulo de atrito da interface solo-solo

Estes coeficientes também são conhecidos como os parâmetros de eficiência da interface solo-geossintético, E_c e E_ϕ respectivamente. (Palmeira *et al.*, 2002; Aguiar, 2003).

Para os geossintéticos planos contínuos (geomembrana, por exemplo) o valor de f tende a ser próximo à unidade no caso de atrito de interface com solos granulares ou mesmo com solos mais finos sob condições de cisalhamento drenado (Palmeira, 1987, Tupa e Palmeira, 1995). Enquanto que o valor de λ está sujeito à significativa variabilidade dependendo das características do solo fino.

2.4.

Ensaio para avaliação da Resistência da Interface Solo - Geossintético

Segundo Massashi *et al.* (1993), os ensaios de laboratório de grande porte são considerados como os mais apropriados ao estudo de interação solo-geossintéticos, visto que oferecem a possibilidade de se efetuar estudos paramétricos de fatores que possam afetar o comportamento do sistema solo-inclusão, além de permitir o aperfeiçoamento das inclusões entre si.

Teixeira (2003) também afirma que as principais vantagens dos ensaios de grande porte são a fidedignidade, a reprodução da estrutura física do maciço reforçado e a capacidade de aplicar níveis de tensão e deformação próximos dos valores de campo.

Os ensaios normalmente utilizados são os de cisalhamento direto e arrancamento. Tem sido observado também o emprego de ensaios de rampa e de ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, ou ainda de cisalhamento direto inclinado.

No subitem a seguir, os ensaios utilizados nesta presente pesquisa, cisalhamento direto, rampa e cisalhamento direto inclinado, serão apresentados com maiores detalhes.

2.4.1. Ensaio de Cisalhamento Direto

Em geral, as caixas de cisalhamento possuem a seção quadrada, com dimensão variando de 60mm, convencionais, até 1000mm, equipamentos de grande porte (Sieira, 2003). Normalmente, as duas caixas têm as mesmas dimensões, podendo a caixa inferior ser maior do que a superior com o objetivo de manter constante a área de cisalhamento. A caixa inferior pode estar preenchida por solo ou pode ser uma base rígida. A utilização ou não da caixa inferior esta ligada ao tipo de geossintético ensaiado.

Os diversos condicionantes do ensaio e a variabilidade de metodologia exigem que se estabeleça uma análise prévia das características do equipamento, do tipo de solo e geossintético, bem como o espaçamento entre as caixas, altura do solo de cobertura, preparação e execução da amostra e ancoragem do reforço. Além das condições de drenagem, tensões aplicadas, velocidade do deslocamento e sistema de aquisição de dados.

Durante o ensaio de cisalhamento direto, aplica-se uma tensão normal constante sob a caixa superior preenchida com solo. Em seguida, mede-se a força horizontal necessária para deslocar a parte superior da caixa de cisalhamento e o deslocamento produzido. Diferentes tensões confinantes vão sendo aplicadas, para definir uma relação entre a tensão cisalhante e a normal e assim obter os parâmetros de resistência ϕ_{sg} e a .

O ensaio não oferece grande dificuldade de interpretação. No entanto, seus resultados podem ser influenciados por fatores associados ao equipamento (posição relativa do geossintético, dimensão do equipamento, espessura da camada de solo e rugosidade do plano rígido) e associados à granulometria dos solos.

A seguir apresentam-se diferentes tipos de influência referentes a este ensaio:

a) Influência da Posição Relativa Solo-Geossintético

Nakamura *et al.* (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto com dois tipos de geogrelhas imersas em areia, em equipamentos de (300 x 300)mm². Foram utilizados dois métodos distintos de instalação de geogrelha. O primeiro

método fixou a geogrelha entre a camada de solo e um bloco rígido, o segundo posicionou a geogrelha entre duas caixas de cisalhamento preenchidas com solo.

Os autores constataram que seria mais adequado posicionar a geogrelha entre o bloco rígido e a camada superior de solo para definir a resistência de interface solo-geogrelha.

Contrariamente, Ingold (1984) e Saez (1997) sugeriram que seria melhor posicionar a geogrelha entre duas camadas de solo, pois quando a base rígida é utilizada, o atrito solo-solo é desconsiderado, obtendo-se desta forma menores ângulos de atrito na interface solo-geogrelha, como ilustra a Figura 5.

As divergências constatadas nas conclusões de Nakamura *et al.* (1996) e Saez (1997) podem estar relacionadas ao tipo de malha da geogrelha. É de se esperar que, quanto menor for a área da geogrelha disponível para o atrito na interface solo-geogrelha, maior será a contribuição do atrito solo-solo. Desta forma, a utilização do bloco rígido pode desconsiderar o atrito na interface. Por outro lado, se a geogrelha apresenta aberturas pequenas e uma área de atrito significativa, a opção do uso de bloco rígido pode ser adequada (Sieira, 2003).

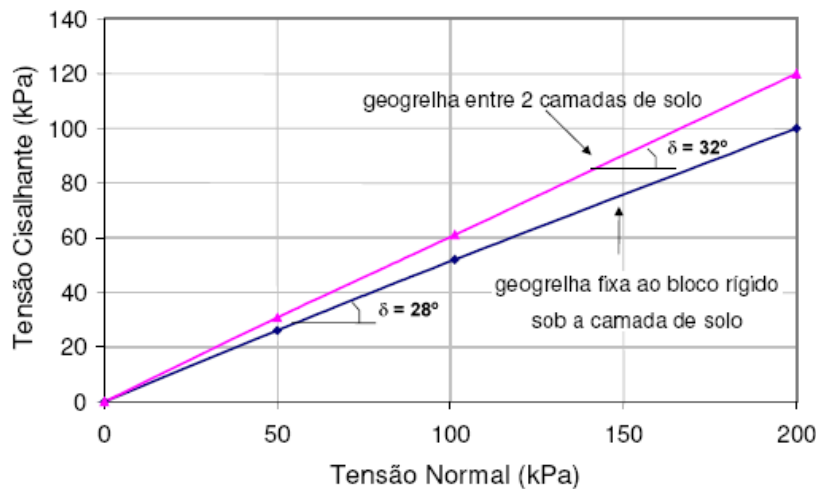


Figura 5 - Efeito da montagem do Ensaio de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)

b) Influência das Dimensões do Equipamento

As dimensões das caixas variam desde os valores convencionais de 6cm x 6cm até 100 x 100cm. Geralmente, ambas as caixas (superior e inferior) possuem as mesmas dimensões. Entretanto, em alguns casos, a caixa inferior é maior do

que a superior, permitindo a obtenção de grandes deslocamentos cisalhantes sem variação da área de contato.

Segundo a recomendação da ASTM D3080, o comprimento das caixas de cisalhamento deve ser pelo menos doze vezes o tamanho da maior partícula de solo. Jewell e Wroth (1987) sugerem que a dimensão mínima da caixa seja pelo menos 50 vezes maior do que o diâmetro médio das partículas de solo (D_{50}).

Estudos sobre a influência da dimensão do equipamento foram feitos por Saez (1997). Este executou ensaios com duas dimensões, 60 e 300mm. Na Figura 6, observa-se que nos equipamentos de menores dimensões, a envoltória não é linear, revelando a relação dependente do ângulo de atrito solo-geogrelha e a tensão normal aplicada, enquanto que no equipamento de maior dimensão a envoltória é linear e o ângulo de atrito independe da tensão normal. Outra observação é a envoltória obtida do ensaio com menores dimensões ter o ângulo de atrito de ensaio maior do que a do ensaio com o equipamento de maior dimensão. Por isso o autor sugere a utilização de equipamentos de cisalhamento direto com dimensões iguais ou maiores do que 300 x 300mm².

Gourc *et al* (1996) sugerem o mesmo para os ensaios com geogrelhas. As duas caixas com o solo deslocam-se entre si, mantendo-se o geossintético ancorado na extremidade para mantê-lo solidarizado a uma delas, buscando simular a movimentação do solo em relação ao reforço.

Tratando-se das geogrelhas, o tamanho mínimo ou mais apropriado da caixa de cisalhamento depende da abertura da geogrelha. Segundo a norma ASTM D5321, a dimensão mínima da caixa deve ser de pelo menos 5 vezes maior do que a abertura máxima da geogrelha ensaiada.

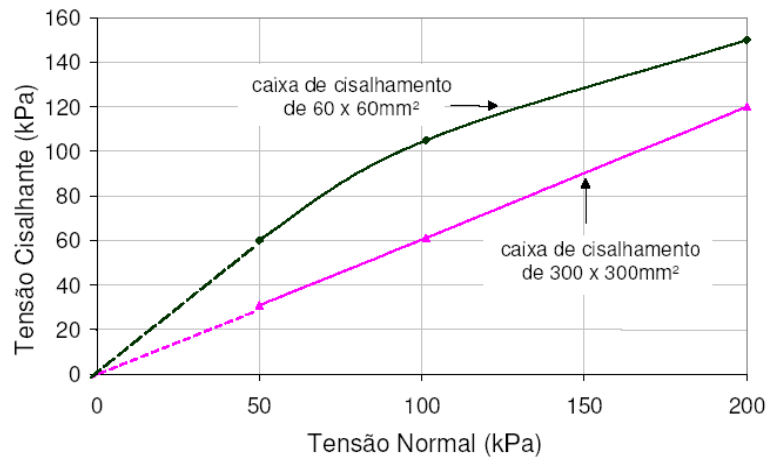


Figura 6 - Efeito das Dimensões do Equipamento de Cisalhamento Direto (Adaptado de Saez, 1997)

Aguiar (2008) avaliou a influência das dimensões das caixas de ensaio, incluiu o aumento ou diminuição da área de contato, a variação da forma da área de contato e a variação da espessura da camada de solo no interior da caixa de ensaio. O autor concluiu que, dentro dos limites de utilização estabelecidos a variação da forma e da área de contato pouco afeta os resultados obtidos. Entretanto os resultados são fortemente influenciados pela variação da relação espessura / comprimento da caixa de ensaio, que interfere na distribuição de tensões ao longo da interface.

c) Influência da Espessura da Camada

Gourc *et al.* (1996) estudaram a influência da espessura do solo no resultado dos ensaios de cisalhamento direto da interface solo-geossintético, onde foram utilizados geotêxtil não tecido e solo arenoso. Os autores concluíram que a tensão cisalhante aumenta com o aumento da espessura de solo, assim como aumenta o atrito lateral solo-caixa também aumenta (Figura 7). A espessura mínima de solo é da ordem de 5 vezes o diâmetro máximo das partículas de solo (Sopeña, 2002).

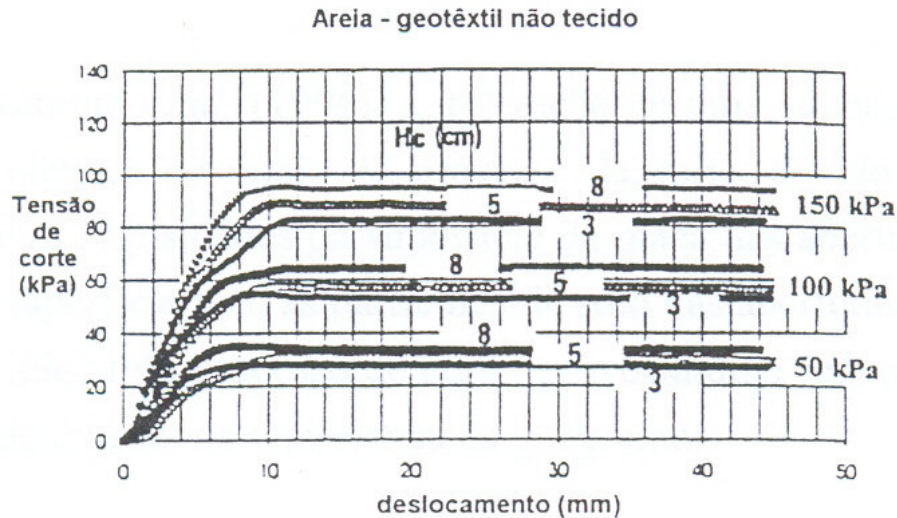


Figura 7 - Influência da espessura de solo da caixa superior na interface areia-geotêxtil em ensaios de cisalhamento direto (Gourc *et al.*, 1996)

Desta forma, existe uma relação aos tipos de solos a ensaiar, pois na maioria dos equipamentos as caixas são de 60 x 60mm² e 300 x 300mm² e as camadas apresentam espessuras entre 25 e 75mm, e os solos ensaiados devem representar um diâmetro máximo de 5 e 25mm, respectivamente (Sieira, 2000).

d) Influência da Rugosidade do Bloco Rígido

A escolha entre o bloco liso ou rugoso deve ser em função do tipo de geossintético a ser usado no ensaio, pois este é um fator que influencia nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Gourc *et al.* (1996) executaram ensaios de cisalhamento direto utilizando geogrelha de barra espessa, sobre dois tipos de suporte, o primeiro liso e o segundo sobre uma camada de areia como suporte alternativo. Os autores concluíram que para o segundo caso, a resistência foi 20% mais elevada.

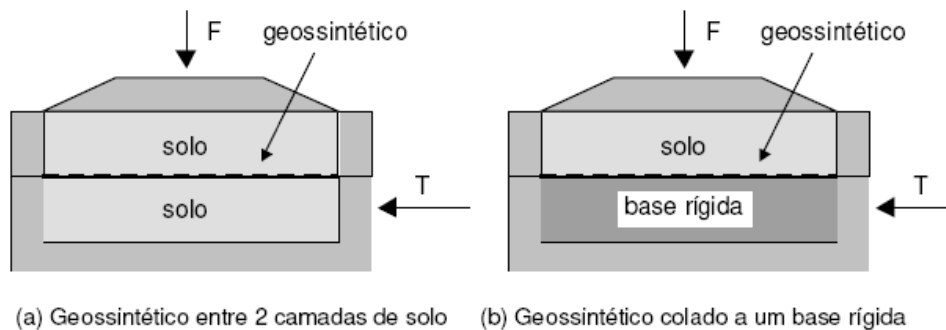
Nakamura *et al.* (1996) revelam que uma superfície rugosa induz uma tensão cisalhante mais elevada devido ao imbricamento entre as partículas de solo e a rugosidade da superfície da placa nas aberturas da grelha. Eles recomendam a colagem de um material rugoso, previamente definido, buscando uma rugosidade semelhante à do solo.

No caso das geogrelhas é aconselhável que seja utilizada a caixa inferior preenchida com solo, pois neste tipo de geossintético a resistência de interface

solo-geogrelha é composta pelas parcelas de atrito ao longo do geossintético e atrito solo-solo entre as aberturas. A última parcela não pode ser obtida quando o geossintético é colocado sob a base rígida. Mesmo assim, é conveniente lembrar que o solo pode sofrer deformações, fazendo com que a posição da geogrelha seja alterada para o início do cisalhamento (Resende, 2005).

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 (Aguiar, 2003).

A Figura 8 sugere a escolha da parte inferior da caixa, preenchida com solo ou base rígida, para dois tipos de geossintético, geogrelha e geomembrana.



(a) Geossintético entre 2 camadas de solo (b) Geossintético colado a uma base rígida

Figura 8 - Sistema de Interação Solo Geossintético no Equipamento de cisalhamento direto (Sieira, 2000)

e) Influência da granulometria do solo

Gomes (1993) estudou a influência da granulometria e da angularidade das partículas do solo, em análise de interfaces solo-geotêxteis, com solos de diferentes faixas granulométricas (brita, seixo, pedrisco e areia) e de diferentes graus de angularidade dos grãos (brita com grãos angulares e seixo com grãos arredondados). O autor afirma que o aumento da granulometria do solo acarreta um aumento dos parâmetros de interface e que este aumento pode ser justificado por mecanismos como travamento, bloqueio e imbricamento dos grãos do solo na superfície do geotêxtil. Ressalta-se que a angularidade dos grãos tende a intensificar os efeitos de travamento e bloqueio do solo ao longo da manta têxtil,

proporcionando a mobilização de maiores tensões cisalhantes. A Tabela 3 apresenta os resultados.

Tabela 3 - Influência da granulometria e da angularidade em interfaces solo-solo e solo-geossintético (Gomes, 1993)

Interface	Solo		Geotêxtil OP20 (*)		Geotêxtil OP30 (*)		Geotêxtil OP60 (*)		Geotêxtil PR-2004 (**)	
	c	ϕ	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}
Areia	0	38,0	0	38,0	1	37,0	0	36,5	1	32,0
Pedrisco	0	37,0	1	37,0	1	37,0	0	37,0	1	35,0
Seixo	0	41,0	2	41,0	1	41,0	0	40,5	0	38,5
Brita	0	45,0	8	42,0	10	44,5	10	43,0	1	42,0

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

Aguiar (2008) estudou a influência do tipo de solo (areia e/ou brita) nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. O autor observou nas interfaces ensaiadas que o aumento do diâmetro do grão acarreta um maior valor do ângulo de atrito. Verificou, também, que há uma redução da eficiência na interface solo-geogrelha, e um aumento para a interface solo-geomembrana.

2.4.2. Ensaio de Rampa

Os ensaios de cisalhamento direto e arrancamento são realizados para se obter a resistência de interface solo-geossintético. Para situações como taludes de áreas de disposição de resíduos, os resultados dos ensaios podem conduzir a erros significativos. Isto se deve à representação incorreta do mecanismo de solitação do geossintético, no caso do ensaio de arrancamento, ou à baixa tensão utilizada no ensaio de cisalhamento direto, fazendo com que o projeto fique contrário à segurança, como constatado por Girard *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 9). São considerados como um ensaio de qualificação em que é possível reproduzir, por exemplo, a estabilidade de um ensaio de

multicamadas ou fluência das interfaces para tensões normais reduzidas (Gouc et al., 1996).

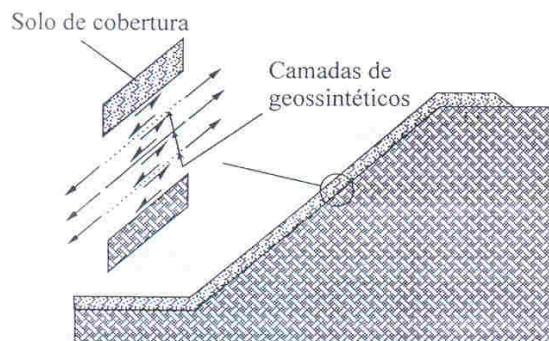


Figura 9 - Esquema de talude de disposição de resíduos com sistemas de multicamadas de geossintéticos (Adaptado Mello *et al.*,2003)

O mecanismo do ensaio de rampa é simples, como pode ser observado na Figura 10. O equipamento consiste em uma caixa superior rígida com solo confinado sob a face do geossintético, fixa a um plano e inicialmente na horizontal, apoiada sobre uma base. Esta base pode ser uma caixa preenchida com solo, ou por uma base rígida, por exemplo, uma placa de madeira. As restrições feitas à base rígida ocorrem quando são ensaiadas interfaces solo-geogrelha, em função da não reprodução da parcela atrito solo-solo nas aberturas da geogrelha.

Existem vários métodos para aplicação das tensões normais, entre eles cita-se a utilização de amostras de solo com diferentes alturas, além da aplicação de sobrecargas através da colocação de placas de concreto, colchões de ar, entre outros.

O ensaio é realizado inclinando-se gradualmente este conjunto até que ocorra o deslizamento completo ao longo da interface solo-geossintético. Os procedimentos do ensaio de rampa encontram-se descritos na ISO 12957-2.

As dimensões das caixas de ensaio geralmente possuem caixas de ensaio com áreas de interface variando de 0,005 a 1m².

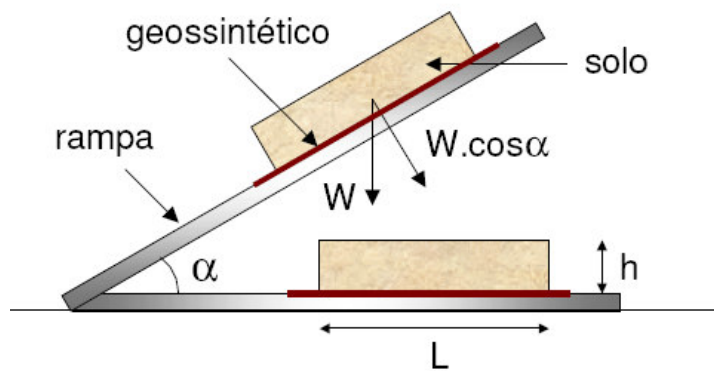


Figura 10 - Conjunto de forças do ensaio de rampa (Rezende, 2005)

O ensaio é executado sob no mínimo três diferentes tensões confinantes para obtenção da envoltória de resistência na interface e assim obter os parâmetros de interface solo-geossintético (a e ϕ_{sg}).

A tensão média sobre a superfície de contato solo-geossintético é definida através da Equação 5.

$$\sigma = \frac{W \cdot \cos \alpha}{A} \quad (5)$$

onde:

σ = tensão normal média que atua na interface;

W = peso da amostra;

A = área de contato solo-geossintético;

α = ângulo de inclinação da rampa.

Os ensaios de rampa não oferecem grandes dificuldades de interpretação. No entanto, os resultados podem estar influenciados por fatores, tais como: tensão de confinamento, tipo de geossintético, tipo de solo, rugosidade do plano rígido e dimensões do corpo de prova. Com relação à influência da velocidade do ensaio e da densidade relativa do solo, são poucas as informações da literatura (Rezende, 2003). Conclui-se que a análise dos resultados de rampa permite afirmar que o equipamento se mostra como excelente ferramenta para analisar o comportamento de interfaces solo-geossintéticos.

Os resultados dos ensaios podem ser influenciados por fatores, tensão de confinamento, tipo de geossintético, tipo de solo e sistema de camadas, entre outros.

a) Influência da Tensão de Confinamento

Uma das restrições do ensaio é a variação da tensão normal com a inclinação da rampa, como observado na Figura 11. A outra limitação seria a forma de distribuição da tensão normal. Geralmente, admite-se que a distribuição da tensão média normal é uniforme ao longo da superfície de contato. No entanto verifica-se que a não uniformidade vai aumentando à medida que a inclinação do plano de cisalhamento aumenta.

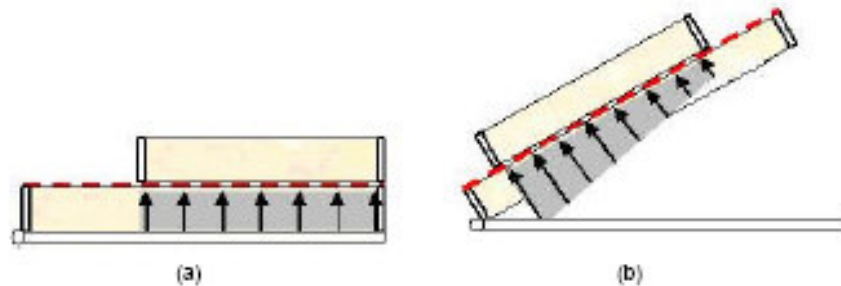


Figura 11 - Variação da distribuição da tensão normal com a inclinação da rampa: (a) condição inicial e (b) durante o ensaio (Rezende, 2005)

Lopes (2001), Palmeira *et al.* (2002), Aguiar (2003) e Resende (2005) admitem que a distribuição das tensões é uma forma trapezoidal e seus valores máximo e mínimo são obtidos através das seguintes relações:

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

$$\frac{\sigma_{\text{mín}}}{\sigma} = \frac{6x}{L} - 2 \quad (7)$$

$$\frac{x}{L} = \frac{\cos \left[\alpha + \tan^{-1} \left(\frac{h}{L} \right) \right]}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \left[1 + \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Onde:

σ máx. = tensão normal máxima;

σ mín = tensão normal mínimo;

σ = tensão normal média;

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

α = ângulo de inclinação da rampa;

h = altura da amostra de solo;

L = comprimento da base da amostra de solo;

W = peso da amostra.

As Equações (6) a (7) indicam que as dimensões da amostra afetam significativamente os valores das tensões máximas e mínimas atuantes, sendo os fatores importantes para equipamentos de pequenas dimensões.

A influência da tensão de confinamento foi estudada por vários pesquisadores (Juran *et al.*, 1998; Farrag *et al.*, 1993; Ladeira, 1995; Pinho Lopes, 1998; Wasti e Özduzgun, 2001; Lopes, 2001; Mello *et al.*, 2003).

Wasti e Özduzgun (2001) realizaram ensaios de cisalhamento inclinado e ensaio de rampa utilizando os mesmos equipamentos descritos em Izgin e Wasti (1998) para interfaces geotêxtil-geomembrana. Foram utilizadas geomembranas de PEAD (lisa e rugosa) e geotêxtil não-tecido (agulhado). Os autores observaram que as variações do ângulo de atrito da interface com o aumento da tensão normal são mais sensíveis para as geomembranas rugosas do que para as lisas (Figura 12).

Lopes (2001) estudou a influência da tensão de confinamento na resistência da interface solo-geossintético através de ensaios de rampa com diferentes geossintéticos para três tensões de confinamento no início do ensaio (5kPa, 10kPa e 25kPa) em um solo arenoso ($D_{máx} = 2,0\text{mm}$) com o geossintético colocado sobre uma base rígida. A autora constatou que a geomembrana lisa e a geogrelha uniaxial foram os materiais que apresentaram menor redução do ângulo de atrito, ao contrário da geomembrana rugosa e da geogrelha biaxial que mostraram maior sensibilidade às variações da tensão de confinamento.

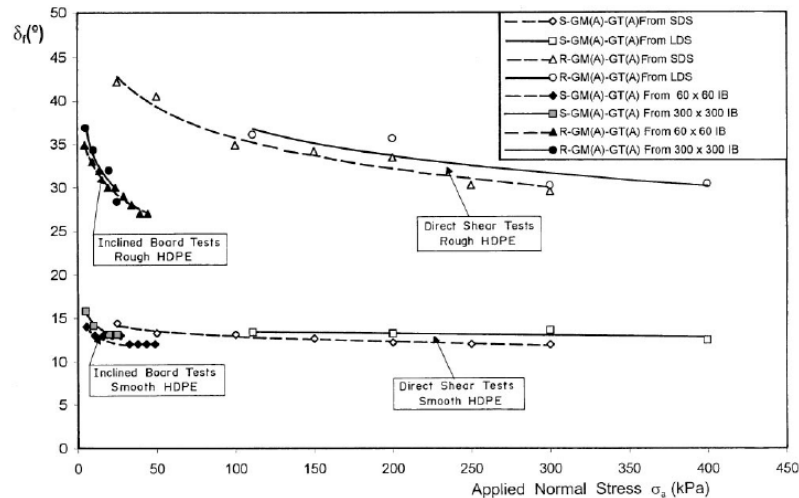


Figura 12 - Influência da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de interface (ϕ_{sg}) (Wasti e Özdüzgun, 2001)

A Tabela 4 mostra a influência das tensões de confinamento para diferentes geossintéticos. Para uma dada tensão de confinamento, a relação entre o ângulo de atrito da interface solo-geossintético para as tensões de confinamento iniciais de 5 kPa e 25 kPa, se mantém constante para os diferentes geossintéticos ensaiados, mostrando a importância do tipo de geossintético na resistência da interface.

Tabela 4 - Influência da tensão de confinamento no comportamento da interface solo-geossintético (Lopes, 2001)

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

Mello *et al.* (2003) realizaram uma série de simulações numéricas para analisar a influência do tamanho da amostra na distribuição de tensões. A Figura 13, baseada em Palmeira *et al.* (2002), apresenta a variação da tensão normal e comprimento normalizado ($L = 0,5, 2$ e 10m) para inclinações de 15° e 25° . A comparação entre os resultados teóricos e os resultados obtidos pela simulação numérica mostram 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.

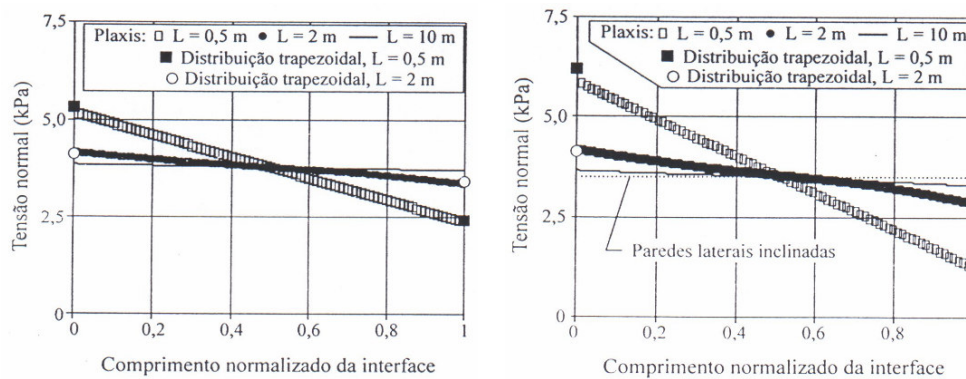


Figura 13 - Variação da tensão normal em função do comprimento normalizado: (a) Inclinação de 15° e (b) Inclinação de 25° (Mello *et al.* 2003)

Gourc *et al.* (1996) sugerem a utilização de caixas de ensaio com faces inclinadas, para 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 ensaio com relação comprimento-altura elevada.

Em relação às envoltórias de resistência obtidas em ambos os ensaios, Izgin e Wasti (1998) observaram que os ensaios em rampa forneceram envoltórias lineares que passam pela origem. No entanto, os ensaios de cisalhamento direto convencionais apresentaram envoltórias com ordenada não nula e ângulos de atrito da interface superiores aos obtidos nos ensaios de rampa.

b) Influência do Tipo de Geossintético

Muitos autores analisaram a influência do geossintético na caracterização da resistência da interface solo-geossintético através dos ensaios de rampa (Izgin e

Wastin, 1998; Lima Jr, 2000; Mello, 2001; Lopes, 2001; Aguiar, 2003; Briançon *et al.*, 2003; Resende 2005).

Giroud *et al* (1990) executaram ensaios de rampa para diferentes interfaces solo-geossintético, sob baixos níveis de confinamento. Os ângulos de atrito da interface obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento em plano inclinado foram inferiores (cerca de 5 a 0°) aos obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto convencionais. Em ambos os trabalhos, os autores acreditam que os ensaios de rampa fornecem ângulos de atrito mais realistas, quando as tensões normais são reduzidas.

Izgin e Wasti (1998) estudaram a resistência ao cisalhamento da interface areia-geomembrana através de ensaios de cisalhamento convencionais e em plano inclinado. Foram ensaiadas geomembranas lisas e rugosas de polietileno de alta densidade. Os autores observaram um ângulo de atrito da interface (ϕ_{sg}) superior no caso de geomembranas com superfícies rugosas.

Lima Júnior (2000) e Mello (2001) executaram ensaios de rampa, utilizando diferentes tipos de geossintéticos (geotêxteis tecido, geotêxtil não tecido, geomembrana lisa e geomembrana rugosa) e diferentes solos (areia fina, areia grossa e argila). Os autores observaram que as características superficiais dos geossintéticos influenciam os mecanismos de ruptura. Os maiores valores de aderência solo-geomembrana foram obtidos nos ensaios com solo argiloso e geomembrana rugosa.

Mello (2001) ressaltou que para pequenas inclinações de rampa, somente uma pequena fração do comprimento da geomembrana é solicitada. No entanto, à medida que a inclinação da rampa aumenta, todo o comprimento da geomembrana é submetido à deformação. A distribuição das deformações ao longo do comprimento da geomembrana é não uniforme.

Lopes (2000) executou uma série de ensaios de rampa (Figura 14) com o objetivo de avaliar a influência da estrutura do geossintético, da granulometria do solo e da tensão confinante no mecanismo de interação solo-geossintético. Para tanto, foram utilizados dois tipos de solos arenosos e sete tipos de geossintéticos incluindo geogrelhas, geotêxteis não tecidos e tecidos e geomembranas. As principais conclusões foram que:

- 1) A estrutura do geossintético influencia a resistência das interfaces solo-geossintético. A estrutura contínua mais lisa (geomembrana lisa) apresenta valores

menores de resistência na interface com o solo. Em contrapartida, o geossintético com a superfície mais rugosa (geotêxtil não-tecido agulhado) apresenta ângulo de atrito mais elevado;

2) Nos ensaios efetuados sobre base rígida, as geogrelhas biaxiais apresentam maior resistência do que as geogrelhas uniaxiais, ao que acontece nos ensaios de arrancamento, onde é possível considerar a contribuição da mobilização da resistência passiva nas barras transversais da geogrelha

3) À medida que a tensão confinante aumenta, verifica-se uma redução no valor do ângulo de atrito da interface solo-geossintético;

4) A utilização de solos com granulometria mais grosseira conduz a um acréscimo da resistência da interface. Este acréscimo é mais acentuado quando o geossintético apresenta uma superfície lisa.

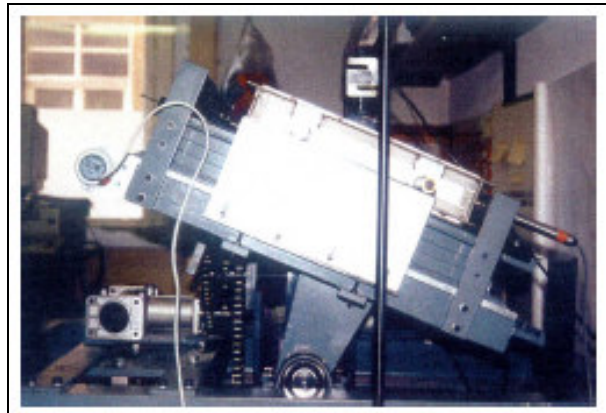


Figura 14 - Equipamento da Universidade do Porto (Lopes, 2001)

Lopes (2001) realizou ensaios de rampa de geossintéticos com estruturas diferentes em um solo arenoso com geossintético colocado sobre uma base rígida e lisa. Foram utilizadas geomembranas lisa e rugosa (pitonada), geotêxtil tecido e não tecido (termosoldado e agulhado) e geogrelha uniaxial e biaxial.

A autora concluiu que o geotêxtil tecido é o que possui menor resistência na interface, em virtude da sua superfície ser formada por filamentos dispostos regularmente tornando-se menos rugosa que a dos não tecidos. A resistência da interface solo-geomembrana rugosa é idêntica à das interfaces solo-geotêxtil, esclarecendo as razões que levam a utilização das geomembranas rugosas em taludes.

Aguiar (2003) realizou ensaios de rampa em geotêxteis não tecidos, geogrelha uniaxial e geomembrana (texturizada em uma das faces) para verificar a resistência da interface com um solo silto-argiloso. A Tabela 5 mostra os valores dos parâmetros de resistência e a eficiência de interação nas interfaces.

Tabela 5 - Influência do tipo de geossintético nos resultados dos ensaios de rampa (Aguiar, 2003)

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

Resende (2005) avaliou, dentre outros, a influência do tipo de geossintético no mecanismo de interação solo-geossintético. Desta forma, a autora utilizou materiais distintos, como uma geomembrana de PVC e uma geogrelha uniaxial de poliéster. Os materiais usados foram areia e brita, com densidades relativas de 35% e 100%. Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

A autora concluiu que os maiores ângulos de rampa na ruptura correspondem à geogrelha. A interface com areia densa ($D_r = 100\%$) foi a que apresentou uma maior diferença, correspondente a 8° , seguida pela interface com areia fofa ($D_r=35\%$) que apresentou uma diferença de 6° . A interface com brita é a que apresenta menor variação do ângulo de rampa na ruptura, equivalente a 3° . Isto pode ser decorrente do ganho de resistência da interface em virtude do aumento da rugosidade da geomembrana provocado pelo arranjo irregular dos grãos da brita. Este ganho de resistência poderia ser menor, caso a brita estivesse com uma densidade relativa maior, pois haveria uma tendência dos grãos situados na interface ficarem dispostos de forma horizontal, diminuindo então a rugosidade na interface.

Tabela 6 - Comparação entre as interfaces solo-geogrelha e solo-geomembrana para a tensão confinante de 3,2 kPa

Geossintético	Solo	Dr (%)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	α (°)	Tensões na Ruptura		
					σ (kPa)	τ (kPa)	τ/σ
Geogrelha	Areia	35	7,00	30	2,8	1,8	0,62
		100	2,00	33	2,8	1,9	0,70
	Brita	35	8,75	34	2,6	1,9	0,73
Geomembrana	Areia	35	4,50	24	3,0	1,4	0,48
		100	0,75	25	3,7	1,78	0,49
	Brita	35	10,75	31	2,7	1,7	0,65

c) Influência do tipo de solo

Giroud *et al.* (1994) apresentam resultados de ensaios em cisalhamento direto e rampa para diversas interfaces, utilizando solo arenoso, solo argiloso e três tipos de geomembranas. Segundo os autores o estudo da interface argila-geomembrana é justificado por esse tipo de situação ser muito comum em aterros sanitários. Em solos não coesivos, a ruptura é brusca, enquanto que para as argilas os deslocamentos acontecem de maneira progressiva à medida que a inclinação aumenta. Além disto, os deslizamentos das argilas compactadas na umidade ótima ocorrem para inclinações maiores que as das areias. Para melhor estudo da interação argila-geomembrana, os autores sugerem ensaios adicionais para determinar a influência da umidade de compactação, assim como taxa de inclinação da rampa. Deve-se observar que os diferentes valores de rigidez à tração das geomembranas também devem ter afetado os resultados apresentados na Figura 15.

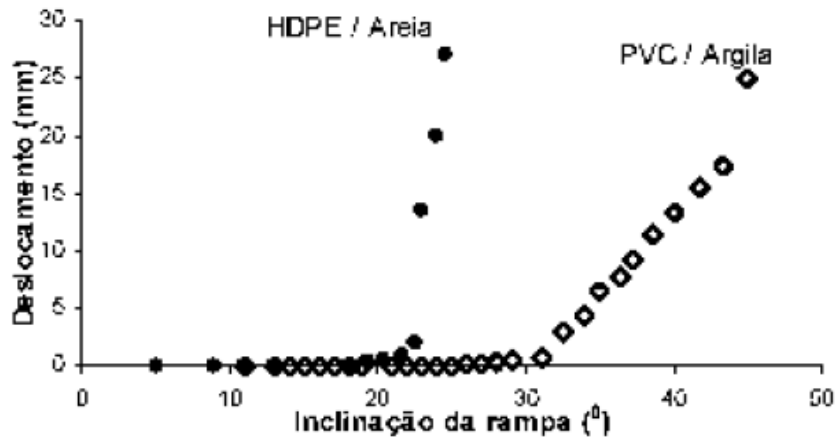


Figura 15 - Deslocamentos medidos em duas interfaces na rampa (Modificado – Girard *et al.*, 1994)

Mello (2001) executou ensaios de plano inclinado em um solo arenoso fino e um argiloso e utilizou três geossintéticos, geotêxteis não-tecidos, geomembranas lisas e geomembrana rugosa. As cargas desenvolvidas nos geossintéticos foram medidas através de uma célula de carga. O autor observou que as cargas medidas nos geossintéticos foram semelhantes para os dois solos, sendo uma única diferença encontrada no valor da carga final (valor que depende da inclinação em que ocorreu o deslizamento e da rigidez à tração do geossintético). Para o geotêxtil não-tecido, a variação ocorre de uma forma não linear, diferentemente para as geomembranas, lisa e texturizada, que apresentam uma forma mais linear, como mostra a Figura 16. Esta diferença no formato das curvas se deu principalmente pela diferença de rigidez à tração dos materiais.

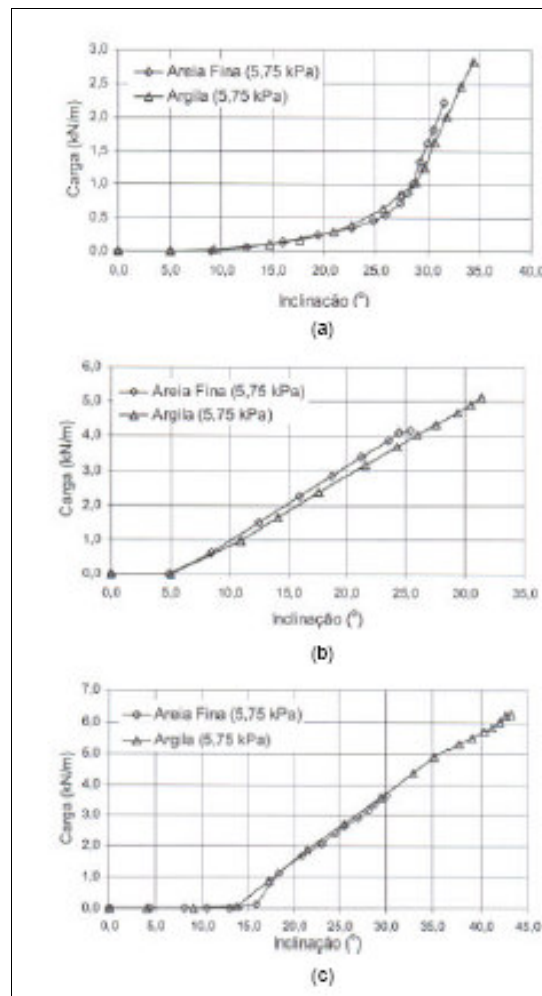


Figura 16 - Comparação das cargas com dois tipos de solo para as interfaces: (a) geotêxtil não-tecido; (b) geomembrana lisa e (c) geomembrana texturizada (Mello, 2001)

Lopes (2001) concluiu através dos seus ensaios apresentados na Tabela 7, que quanto maior a granulometria dos solos arenosos, maior será a influência nos geossintéticos de superfície lisa (geomembrana lisa, seguida pelo geotêxtil tecido) devido ao aumento da superfície de contato entre o solo e o geossintético. A influência da granulometria de solo em geossintéticos com superfície rugosa é menor porque a própria rugosidade permite aumentar o contato com o solo. A autora ressalta que independente da granulometria, as interfaces com geomembrana lisa e geogrelha uniaxial continuam sendo menos resistentes.

Aguiar (2008) observou que as interfaces com geomembrana apresentam menor resistência, quando comparadas às interfaces solo-geogrelha devido o tipo de estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência pelo fato de

possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo com as aberturas da malha da geogrelha.

Tabela 7 - Influência da granulometria do solo nos resultados dos ensaios de rampa (Lopes, 2001)

Geossintético	Solo 1	Solo 2(*)	% aumento
	Ângulo de Atrito na Interface (°)		
Geomembrana lisa	21,4	24,5	14,6
Geomembrana rugosa	31,2	32,9	5,5
Geotêxtil tecido	30,5	33,6	10,2
Geotêxtil não tecido termossoldado	31,7	32,3	2,1
Geotêxtil não tecido termossoldado	32,2	32,9	2,1
Geogrelha uniaxial	27,6	29,5	6,6
Geogrelha biaxial	30,1	33,0	9,5

(*) Solo com dimensão de partícula maior.

d) Influência dos sistemas de camadas

No campo, é muito comum a utilização de duas camadas ou mais de geossintéticos em contato. Um dos exemplos é em obras de disposição de resíduos, a presença de geotêxtil sobre ou sob uma camada de geomembrana pode ter as funções de drenagem, proteção da geomembrana contra os danos mecânicos ou como camada de absorção de tensões de tração (camada de aderência) para minimizar a transferência de tensões para a geomembrana. Desse modo, o sistema de cobertura é formado por interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético, com diversas resistências de interface e deformabilidade que levam a complexos e práticos mecanismos de interação e deformabilidade (Figura 17). Dependendo do valor da inclinação do talude, as camadas de solo de cobertura podem vir a ser compactada de forma bastante precária. Deste modo, o ensaio de plano inclinado assume grande importância para a quantificação da resistência da interface entre diferentes materiais, servindo de subsídio para o projeto de taludes de área de escavação (Resende, 2005).

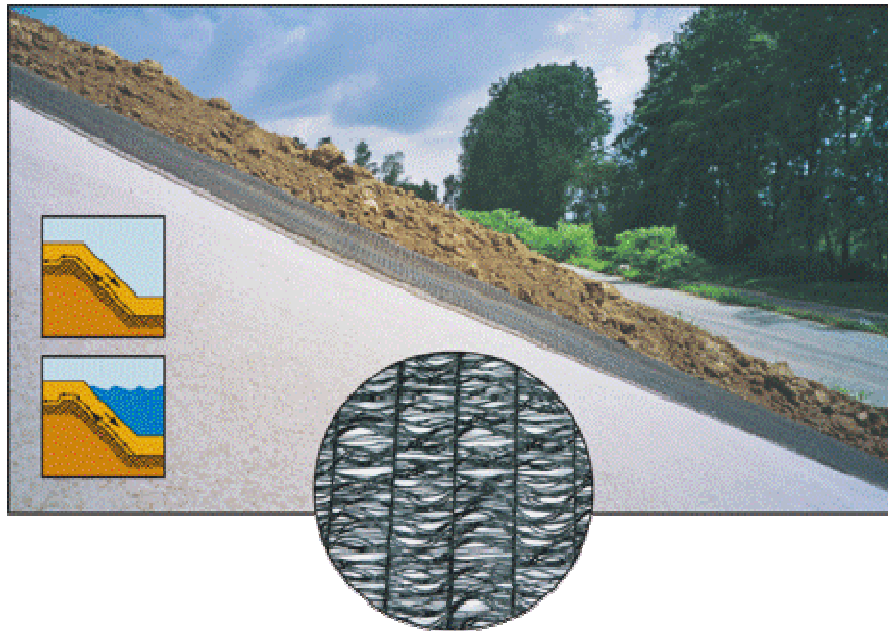


Figura 17 - Situação típica em um talude reforçado com geossintéticos

2.4.2.1. Equipamentos para ensaio de Rampa

A literatura apresenta diversos tipos de equipamentos de ensaio de rampa, os quais estão sucintamente descritos na Tabela 8.

O equipamento de Aguiar (2003) foi desenvolvido na PUC-Rio em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGS). Segundo o autor o equipamento foi elaborado considerando-se uma série de recomendações encontradas na literatura, principalmente na norma européia ISO 12957-2.

O conjunto é constituído por uma estrutura de suporte, sistema de carregamento, caixas de ensaio e instrumentação e por seus componentes básicos, sistema de basculamento e caixas de ensaio. A estrutura é composta por uma série de perfis de aço soldados, formando um sistema único, dimensionado de forma a resistir aos esforços solicitantes dos ensaios propostos. A base é constituída por perfis I de 6 polegadas (15,24cm), com dimensões iguais a 2,50m de comprimento e 1,35m de largura (Figura 18).

Tabela 8 - Equipamentos de Rampa (Aguiar, 2008)

Autor	Caixas de Ensaio						VI (cm/min)	Medições	STN
	Inferior			Superior					
	c	l	h	c	l	h			
Girard <i>et al.</i> (1990)	100	100	5	100	100	20	5	AI	peso do solo
Gourc <i>et al.</i> (1996)	150	150	-	100 ou 50	100 ou 50	-	-	AI, DH	solo e placas de aço
Izgin (1997)	não tem caixa inferior			60 200 300	60 200 300	-	1 a 6,5 (°/min)	-	solo e placas de aço
Lalarakotoso n <i>et al.</i> (1999)	não tem caixa inferior			100	70	30	-	AI, DH	peso do solo
Lima Jr. (2000)	não tem caixa inferior			192	47	25	-	AI, DH, CG	solo e placas de concreto
Lopes (2001)	51	35	8	30	30	8	0,5	AI, DH, CV	solo e placas de aço
Briançon <i>et al.</i> (2002)	200	120	30	100	100	50	0,5 a 3,5 (°/min)	AI, DH, CG	peso do solo
Najero (2003)	não tem caixa inferior			não tem caixa superior			5 (°/min)	AI	placas de concreto
Aguiar (2003)	120	100	5	100	100	5	~1 (°/min)	AI, DH	solo e placas de aço

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

VI = velocidade de inclinação da caixa; STN = sistema de aplicação de tensão normal;

AI = ângulo de inclinação da rampa, DH = deslocamento horizontal da caixa superior,

CG = carga no geossintético e CV = carga vertical aplicada na amostra.



Figura 18 - Estrutura principal do equipamento desenvolvido por Aguiar (2003)

A plataforma de ensaio é uma placa de aço de 0,64cm de espessura com dimensões de 1,1m de largura por 1,3m de comprimento. Enrijecida com perfis U de 2 polegadas (5,08cm x 2,54cm x 0,64cm) e barras chatas de 2 polegadas (5,08cm x 0,32 cm) soldadas em sua face inferior. Sua área útil é de 1,0m largura x 1,2m comprimento, com as extremidades destinadas à fixação das caixas de ensaio.

Esta estrutura foi construída previamente por Aguiar (2003) e corresponde a base para o equipamento utilizado por Rezende (2005), as alterações no equipamento foram no sentido de aumentar a precisão dos resultados. Segundo a autora, a primeira delas foi a fixação de um ponto de medição dos deslocamentos da caixa superior, tornando possível o monitoramento dos deslocamentos nas duas extremidades da caixa (Figura 19). A outra alteração refere-se ao sistema de

fixação do geossintético (Figura 20), o qual constitui de uma garra metálica, fixada na caixa inferior através de dois perfis U, permitindo-se assim o alinhamento do geossintético entres as duas caixas (plano de ruptura) diminuindo o tempo de preparação dos corpos de prova, já que não existe mais a necessidade de fixar o geossintético em ambos os lados. Uma vista geral do equipamento pode ser observada na Figura 21.

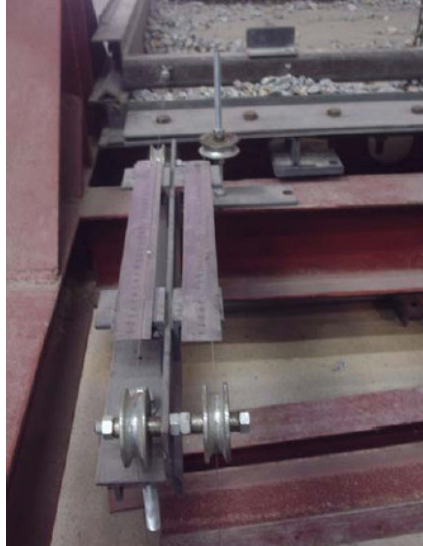


Figura 19 - Sistema de monitoramento dos deslocamentos (Rezende,2005)



Figura 20 - Sistema de fixação do geossintético (Rezende,2005)



Figura 21 - Equipamento de Rampa da PUC-Rio (Aguiar, 2003)

2.5. Considerações Finais

Neste capítulo foi feita uma revisão sobre os ensaios de cisalhamento direto e de rampa, citando os diversos equipamentos encontrados na literatura, os fatores que influenciam os resultados, entre eles, tensão de confinamento, tipo de geossintético, tipo de solo, rugosidade do bloco rígido e configuração do corpo de prova.

3 Programa Experimental

3.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta o programa de ensaios realizado na presente pesquisa, bem como a descrição dos materiais, a preparação dos corpos de prova, a montagem e calibração do equipamento e os procedimentos experimentais.

Os ensaios foram particularmente realizados com o objetivo de obter os parâmetros de resistência de interação solo-geossintético e as eficiências das interfaces. Assim, definiu-se um programa de ensaios utilizando diferentes tipos de geossintéticos, submetido a diferentes tensões confinantes.

3.2. Materiais Utilizados

No programa experimental, utilizou-se um tipo de solo: pedregulho (brita) e dois tipos de geossintéticos: geogrelha de poliéster e geomembrana de PEAD. Para fins comparativos, os materiais escolhidos foram os mesmos usados por pesquisas anteriores na PUC-Rio.

3.2.1. Solo

A brita (BR) ensaiada é um pedregulho uniforme, de origem granito-gnáissica, com partículas compreendidas entre 0,42 mm e 9,25 mm de diâmetro, conhecido comercialmente como Brita Zero. Os pesos específicos, mínimo e máximo, são 13,80 e 16,42 kN/m³, respectivamente. A densidade relativa (D_r) foi de 15%, correspondendo a um peso específico de 14,14 kN/m³. A amostra representativa da brita está mostrada na Figura 22.

A Figura 23 apresenta a curva granulométrica da brita. A Tabela 9 e a Tabela 10 resumem algumas de suas características, como diâmetros máximo

($D_{m\acute{a}x}$) e mínimo ($D_{m\acute{i}n}$), os diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} , os coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c), os pesos específicos do solo (γ), o peso específico máximo ($\gamma_{m\acute{a}x}$), mínimo ($\gamma_{m\acute{i}n}$) e o referente  $D_r=15\%$ ($\gamma_{D_r=15\%}$), o ndice de vazios máximo ($e_{m\acute{a}x}$), mínimo ($e_{m\acute{i}n}$) e o referente  $D_r=15\%$ ($e_{D_r=15\%}$).

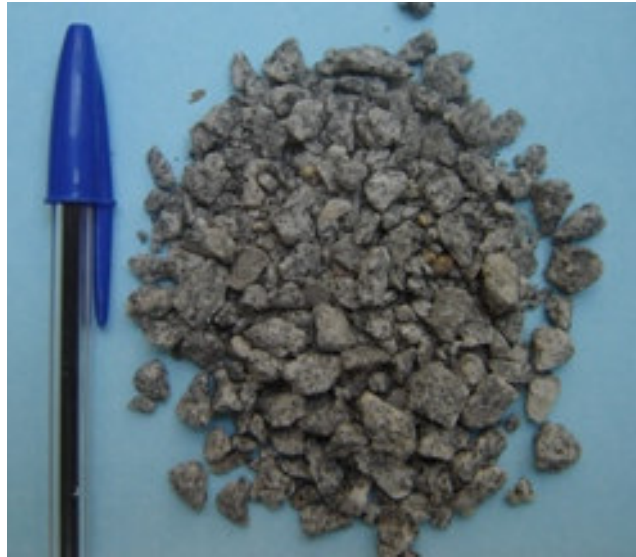


Figura 22 - Amostra representativa da brita ensaiada

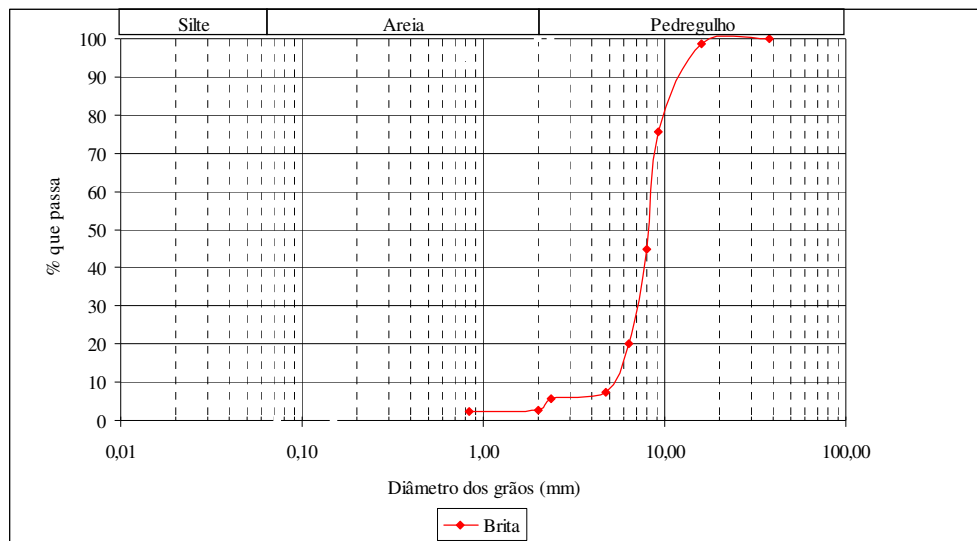


Figura 23 - Curva Granulométrica da Brita

Tabela 9 - Características granulométricas da brita

Solo	D_{\min}	D_{10}	D_{30}	D_{60}	D_{\max}	C_u	C_c
	(mm)						
Brita (BR)	0,42	2,85	5,60	7,00	9,53	2,46	1,57

Tabela 10 - Características físicas da brita

Solo	γ_s	γ_{\max}	$\gamma_{Dr=15\%}$	γ_{\min}	e_{\min}	$e_{Dr=15\%}$	e_{\max}
	(kN/m ³)						
Brita (BR)	25,8	16,42	14,14	13,80	0,57	0,83	0,87

A Figura 23 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-BR obtida a partir dos resultados do ensaio de cisalhamento direto em grandes dimensões. Os parâmetros obtidos foram: coesão (c) de 0 kPa e ângulo de atrito (ϕ) de 36,6°.

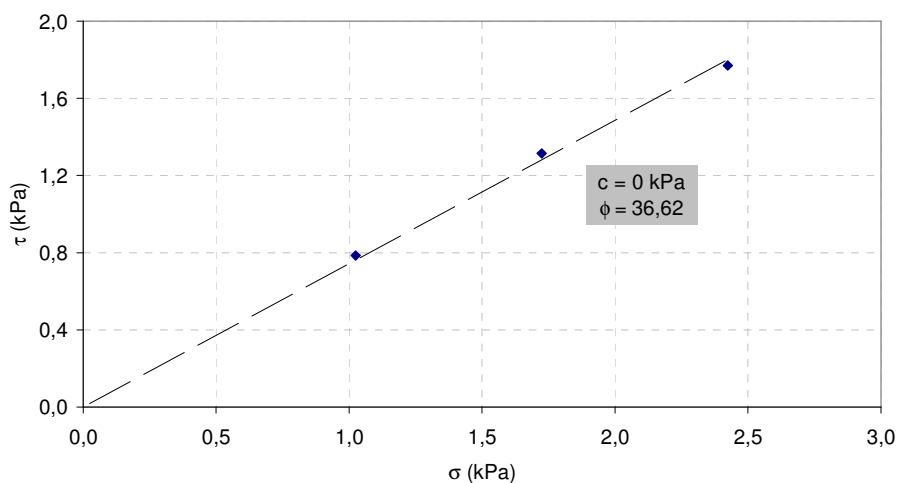


Figura 24 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

3.2.2. Geossintéticos

A geogrelha ensaiada (Figura 25) foi a Fortrac 35 MP, constituída de um poliéster de alta tenacidade, revestida de PVC. As propriedades físicas da GG foram fornecidas pelo fabricante (HUESKER) e estão apresentadas na Tabela 11.

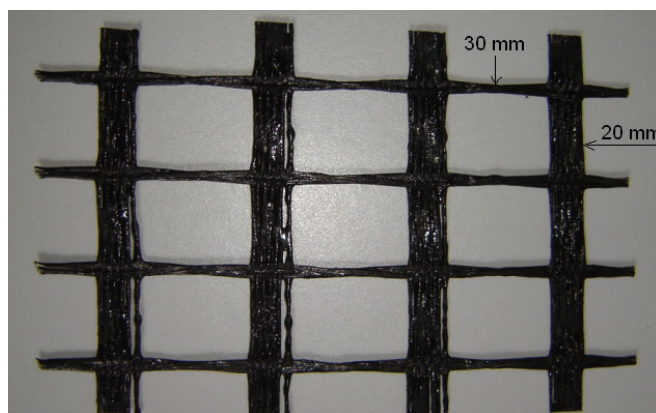


Figura 25 - Amostra representativa da Geogrelha (GG) ensaiada

Tabela 11 - Característica da Geogrelha Fortrac 35/25-20/30 (Huesker, 2008)

Característica	Valor	Norma
Abertura	20 x 30 mm	
Resistência à Tração	Longitudinal	35 kN/m
	Transversal	20 kN/m
Alongamento na Ruptura	4-6%	ASTM D 6637

A geomembrana utilizada (Figura 26) foi uma polimanta de PEAD lisa nas duas faces, com propriedades fornecidas pelo fabricante (ENGEPOL) listadas na Tabela 12.



Figura 26 - Amostra representativa da Geomembrana (GM) ensaiada

Tabela 12 - Característica da Geomembrana Polimanta (Engepol, 2007)

Propriedade	Método de Ensaio	Valor
Espessura Nominal	ASTM D 5199	1 mm
Densidade	ASTM D 792	$\geq 0,94 \text{ g/cm}^3$
Resistência à Tração:		
• No Escoamento		$\geq 15 \text{ kN/m}$
• Na Ruptura		$\geq 27 \text{ kN/m}$
• Alongamento no Escoamento	ASTM D 6693	$\geq 12 \%$
• Alongamento na Ruptura		$\geq 700\%$
Resistência ao Rasgo	ASTM D 1004	$\geq 125 \text{ N}$
Resistência ao Puncionamento	ASTM D 4833	$\geq 320 \text{ N}$

3.3. Preparação dos Corpos de Prova

As amostras foram preparadas seguindo a norma DIN EM 963. Esta recomenda que, do rolo de origem, seja desprezadas as duas primeiras voltas e 10 cm das laterais. As amostras, tanto de GM como de GG, tiveram dimensões de 1,5 de comprimento por 1,0 m de largura. Para cada ensaio foram confeccionadas amostras compatíveis com a configuração da caixa inferior, ou seja, largura de

0,5m e comprimento igual a 1,40m, 20 cm a mais que o comprimento da caixa para garantir a ancoragem na garra metálica.

Como a Dr da brita foi de 15%, não houve necessidade de compactação, pois o material alcançava os índices de vazios somente com o seu lançamento na caixa, com o auxílio de uma concha metálica (Figura 27a).

O método de preparação dos corpos de prova independe do tipo de ensaio, Inicia-se pela limpeza da caixa inferior, logo após, lança-se, cuidadosamente, o volume já conhecido de solo e nivela-se a superfície do solo deixando-a pronta para receber o geossintético, que era esticado e ancorado (Figura 27c).

Após a fixação do geossintético, coloca-se a caixa superior de ensaio, prende-se os limitadores de deslocamentos e instala-se a instrumentação (*tell-tale*). Então, lança-se o solo, repetindo o procedimento da caixa inferior (Figura 27d).



(a) Lançamento do solo



(b) Caixa inferior preenchida de solo



(c) Geossintético instalado



(d) Caixa superior preenchida de solo

Figura 27 - Preparação do corpo de prova

Para finalizar, aplica-se a tensão de confinamento utilizando uma tampa de madeira, e/ou placa de aço. Estas três tensões confinantes diferentes, causadas pelo solo, tampa e placa, possibilitaram a construção de uma envoltória de resistência e conseqüentemente, a obtenção dos parâmetros de resistência para as interfaces solo-solo e solo-geossintético. O espaçamento de 3mm era dado entre as caixas para garantir o livre deslizamento da caixa superior.

Para o ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado, é necessária a instalação do medidor de ângulo de base magnética. A Figura 28 apresenta a plataforma de ensaio de rampa pronta para iniciar o ensaio. Esta configuração é para a tensão confinante intermediária, com placa de madeira mais duas placas de aço.



Figura 28 - Conclusão da preparação do corpo de prova para o ensaio de rampa (tensão confinante intermediária)

Para os ensaios de cisalhamento direto convencional ou inclinado, é necessário instalar a plataforma de aplicação de força cisalhante (Figura 29a) e os grampos tipo C para bloquear o movimento da caixa durante a inclinação da plataforma (Figura 29b). Finalizando, instalam-se os anéis de carga e os suportes das roldanas, prendem-se os cabos de aço e nivela a plataforma de carga.



(a) Plataforma de aplicação de cargas (b) Grampo tipo C para unir as caixas

Figura 29 - Acessórios utilizados apenas para os ensaios: cisalhamento direto e inclinado

3.4. Equipamento

O equipamento utilizado na presente pesquisa foi desenvolvido por Aguiar (2008). Este equipamento consiste em uma estrutura metálica, composta por perfis que foram dimensionados e soldados para resistir aos esforços solicitantes. O equipamento apresenta dimensões de 2,5m de comprimento, 1,4m de largura e 2,5m de altura.

As caixas de ensaio apresentavam dimensões internas de 0,5m de largura por 1,0m de comprimento (superior) e 0,5m de largura por 1,2m de comprimento (inferior).

O uso de uma caixa inferior de maior dimensão justifica-se pelo fato de se manter sempre uma área de contato de $0,5\text{m}^2$ em qualquer momento do ensaio. Além disto, evita-se perda de materiais com o movimento da caixa. Esta diferença de comprimento corresponde ao deslocamento cisalhante máximo permitido pelo sistema. Ambas as caixas possuem altura útil de 0,1m.

Este conjunto de caixas de ensaio, com pequenas alterações e uso de diferentes acessórios, permite a realização dos três tipos de ensaios: ensaio de rampa (Figura 30), ensaio de cisalhamento direto convencional e ensaio de cisalhamento direto inclinado (Figura 31).

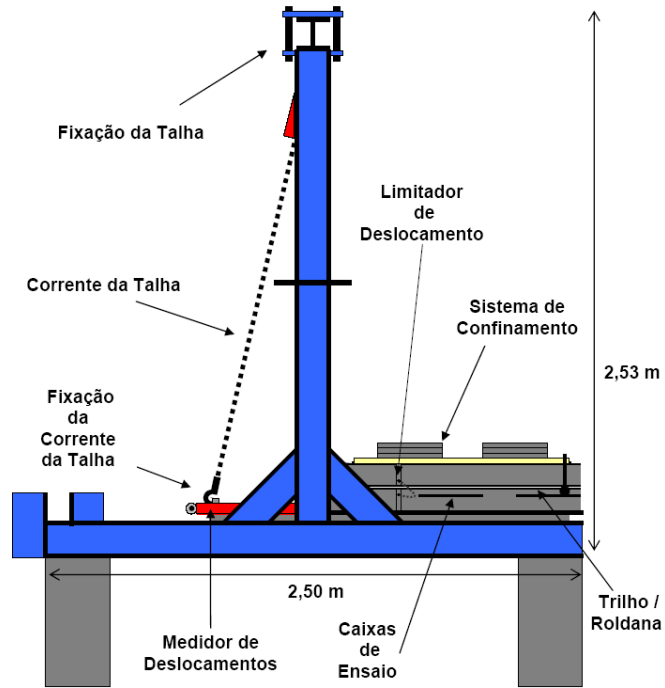


Figura 30 - Configuração para ensaio de Rampa (Aguiar, 2008)

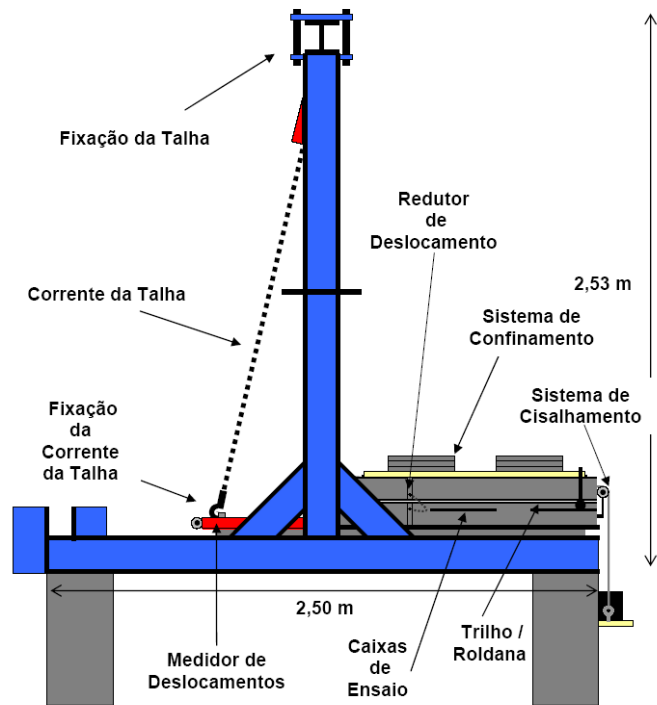


Figura 31 - Configuração para ensaios de Cisalhamento Direto e Inclinado (Aguiar, 2008)

3.5. Metodologia de Ensaio

3.5.1. Ensaio de Rampa

O procedimento do ensaio de rampa é simples, inicialmente inclina-se a rampa através de uma talha que movimenta a base metálica, esta base é livre em uma das extremidades e rotulada na outra. O conjunto é inclinado gradualmente e os ângulos são monitorados por um medidor de base magnética com resolução de $0,5^\circ$. A caixa superior desliza sobre roldanas que correm sobre os trilhos de 2 cm de altura. Os deslocamentos da caixa são medidos nas duas extremidades (direita e esquerda), através de dispositivos extensométricos do tipo *tell-tale*, até que haja a ruptura da interface (Figura 32).



Figura 32 - Ensaio de rampa após a ruptura

3.5.2. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

O procedimento do ensaio de cisalhamento direto é similar ao cisalhamento direto convencional para pequenas dimensões. Ambos se baseiam diretamente no critério de Coulomb. Aplica-se uma força axial, em seguida exerce-se uma força tangencial na caixa superior que a desloca, com velocidade constante, até que ocorra a ruptura. O plano de ruptura é necessariamente na horizontal e entre as duas caixas de cisalhamento. Durante os ensaios tem-se a força normal ao plano

de ruptura, mede-se a força cisalhante exercida na caixa superior e o seu deslocamento médio em relação à caixa inferior.

3.5.3. Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

O procedimento do ensaio de cisalhamento inclinado também é relativamente simples. Com a talha, inclina-se o conjunto de caixas até o ângulo pré-determinado, o qual é medido com o auxílio do medidor de base magnética, fixado na caixa superior. Mesmo com o grampo prendendo as duas caixas, monitoram-se possíveis deslocamentos da caixa superior em relação a inferior até que atinja o ângulo de rampa desejado. Assim, a tensão cisalhante é exercida através dos pesos sobre a plataforma de aplicação de cargas. Para cada peso aplicado, liam-se os deslocamentos da caixa até se verificar a ruptura da interface.

A Figura 33 mostra a inclinação da plataforma para o ensaio de cisalhamento direto inclinado. Observa-se o grampo tipo C impedindo o movimento da caixa superior, durante a inclinação.



Figura 33 - Plataforma durante o ensaio de cisalhamento direto inclinado

3.6. Programa de Ensaio

A Tabela 13 apresenta todos os ensaios realizados, totalizando 39 ensaios. Esta campanha procurou avaliar a influência do tipo de solo, do tipo de

geossintético na interface e comparar os resultados obtidos em cada um dos três diferentes ensaios.

A convenção da simbologia para identificar os ensaios e interfaces foi baseada em Aguiar (2003), Rezende (2005) e Aguiar (2008). A brita será identificada pela sigla BR. As siglas dos geossintéticos são GG, para as geogrelhas e GM para geomembranas. Para os ensaios considerou-se as seguintes abreviaturas: ensaio de rampa, RP; ensaio de cisalhamento direto convencional, CC; ensaio de cisalhamento direto inclinado a 4,5°, CI-4,5; cisalhamento direto inclinado a 9,0°, CI-9,0 e cisalhamento direto inclinado a 18,0°, CI-18,0.

Tabela 13 - Programa de ensaios

Tipo de Ensaio	Interface	Simbologia	Nº de Ensaios	σ_c (kPa)			
RP	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CC	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CI-4,5	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CI-9,0	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geomembrana	BR-GM	3	1,0	1,7	2,4
CI-18,0	Brita	Brita	BR-BR	3	1,0	1,7	2,4
	Brita	Geogrelha	BR-GG	3	1,0	1,7	2,4
Total de ensaios				39			

4 Análise dos Resultados

4.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nesta pesquisa. Serão apresentados a metodologia de análise de resultados e os dados obtidos dos ensaios. A forma de apresentar consiste em avaliar a influência da tensão confinante, do geossintético e das eficiências da interface. Em seguida, serão analisados os resultados em função do tipo de ensaio.

4.2. Metodologia de Análise de Resultados

Nesta dissertação foram utilizados três tipos de ensaios: rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado. Para cada um destes ensaios foi aplicada uma metodologia de análise diferente. Sobre cada uma podemos afirmar:

Ensaio de Rampa

Apesar de simples, este ensaio apresenta uma restrição no que se refere à aplicação da tensão normal. Com a inclinação gradual da rampa, a distribuição da tensão normal varia assumindo um formato aproximadamente trapezoidal (Palmeira *et al.* 2002). Porém, para efeito de análise dos resultados, assume-se uma tensão de confinamento média uniformemente distribuída.

A Figura 34 esquematiza o conjunto de forças atuantes no ensaio de rampa, onde P é a força vertical, $P \cdot \cos\alpha$ a componente normal e $P \cdot \sin\alpha$ a componente cisalhante. Q é a componente do peso da caixa superior que exerce apenas a componente tangencial, a componente vertical é resistida pela caixa inferior não exercendo força axial no ensaio.

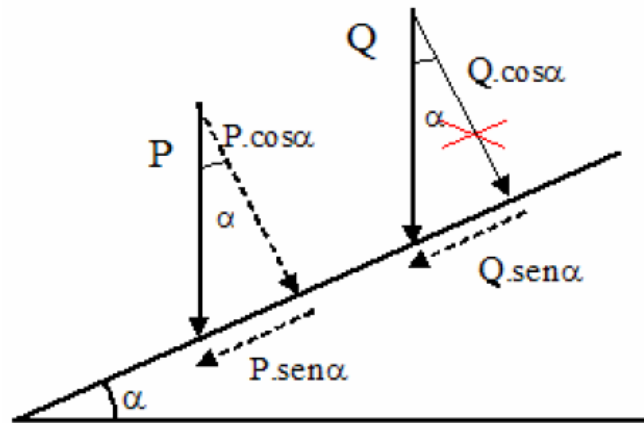


Figura 34 - Esquema de forças do Ensaio de Rampa. (Aguiar, 2003)

Desta forma tem-se:

$$\sigma = \frac{P \times \cos \alpha}{A} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{P \times \text{sen} \alpha + F}{A} \quad (10)$$

Onde:

σ = tensão normal na interface

τ = tensão cisalhante na interface

P = força vertical confinante

A = área de contato solo-geossintético

α = ângulo de inclinação da rampa

F = componente tangencial do peso da caixa superior

Q = peso da caixa superior

Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

No ensaio cisalhamento direto a tensão normal é a relação entre a força normal sobre a área de contato (Equação 9), sendo que a força normal, resultante do peso do solo mais o confinamento aplicado. A tensão cisalhante é força aplicada, através dos pesos na plataforma, sobre a área de contato da interface (Equação 12). Desta forma tem-se:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (12)$$

Onde:

σ = tensão normal na interface

τ = tensão cisalhante na interface

N = força vertical confinante

A = área de contato solo-geossintético

T = componente tangencial do peso da caixa superior

Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado

No ensaio de cisalhamento inclinado a tensão cisalhante é resultante do peso da caixa, solo, confinamento e peso aplicados na plataforma sobre a área de contato da interface. A tensão normal é a resultante do peso do conjunto caixa mais o solo e peso de confinamento sobre a área de contato (Equação 13). A tensão cisalhante é resultante das forças C, $P.\text{sen}\alpha$ mais $Q.\text{sen}\alpha$ (Equação 14). A Figura 35 apresenta as componentes das forças atuantes no ensaio de cisalhamento direto inclinado.

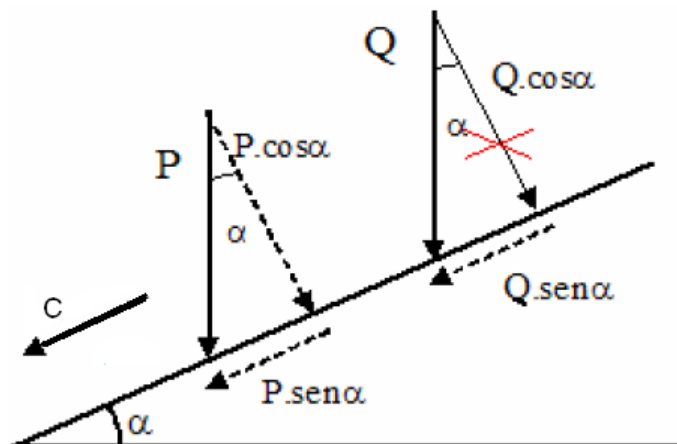


Figura 35 - Esquema de forças do Ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado. (Aguiar, 2008)

Desta forma tem-se:

$$\sigma = \frac{P \times \cos \alpha}{A} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{P \times \sin \alpha + F + C}{A} \quad (14)$$

Onde:

C = carga aplicada na plataforma. $C = M \times g$, onde M é a massa depositada na plataforma de carga e g é a gravidade.

4.3. Apresentação dos Resultados

Adotou-se o critério de Coulomb para análise do estado tensões. Os resultados serão apresentados e padronizados através de dois tipos de gráficos: deslocamento da caixa superior *versus* tensão cisalhante e envoltórias de resistência de cada interface obtidas a partir de três submetidos a diferentes tensões confinantes.

As tabelas apresentam os valores da tensão normal inicial (σ_n), do deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), do ângulo de rampa na ruptura (α_{rup}), das tensões normais (σ_{rup}) e cisalhantes na ruptura (τ_{rup}), da relação entre as tensões e ângulos de atrito secante (ϕ_{sec}).

Também são empregados nas análises os valores de eficiências de interfaces. Koerner (1998) define dois parâmetros para de eficiência: eficiência em termos de coesão (E_c) e eficiência em termos de ângulo de atrito (E_ϕ). Como mostra a Equação 15, a eficiência na coesão relaciona a adesão na interface (a) e a coesão do solo (c) e a eficiência de atrito, relaciona as tangentes dos ângulos de atrito da interface (ϕ_{sg}) e do solo (ϕ) (Equação 16).

$$E_c = \frac{a}{c} \quad (15)$$

$$E_\phi = \frac{\tan \phi_{sg}}{\tan \phi} \quad (16)$$

Os valores de eficiência existentes na bibliografia geralmente variam de 0,60 a 1,0. Valores maiores que a unidade não são comuns, pelo fato de que

representariam uma interface com resistência maior que a do solo (Koerner, 1998). Neste caso a superfície de ruptura seria levada para dentro da massa de solo e a resistência ao deslizamento seria limitada pela resistência ao cisalhamento.

As tabelas apresentam os valores da tensão normal inicial (σ_n), do deslocamento da caixa de ensaio na ruptura (δ_{rup}), do ângulo de rampa na ruptura (α_{rup}) do peso total aplicado à plataforma na ruptura (M_{rup}), das tensões normais (σ_{rup}) e cisalhantes na ruptura (τ_{rup}), da relação entre as tensões e ângulos de atrito secante (ϕ_{sec}).

Os resultados de cada tipo de ensaio serão apresentados e analisados em termos da influência da tensão confinante e a influência do geossintético. Em seguida, serão analisados os resultados em função do tipo de ensaio.

4.4. Ensaio de Rampa – RP

4.4.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

A Tabela 14 e a Figura 36 apresentam os resultados dos ensaios de rampa para a interface BR-BR. Pode-se observar que o aumento da tensão confinante implicou em um aumento do deslocamento até a ruptura, entretanto não se percebe este comportamento para o ângulo de rampa, que aumentou em 5° para as menores tensões e permaneceu constante para a maior. Verifica-se através dos crescentes valores de tensão cisalhante, que quanto maior a tensão confinante, maior o ângulo de atrito da interface, este comportamento deve-se à possibilidade de rearranjo e imbricamento entre os grãos da brita. Tal efeito pode ser observado durante o ensaio através do ruído provocado pelo contato entre as partículas.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de Rampa para as interfaces BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (°)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	18,5	30	0,89	0,76	0,85	40,4
	1,7	28,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
	2,4	31,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0

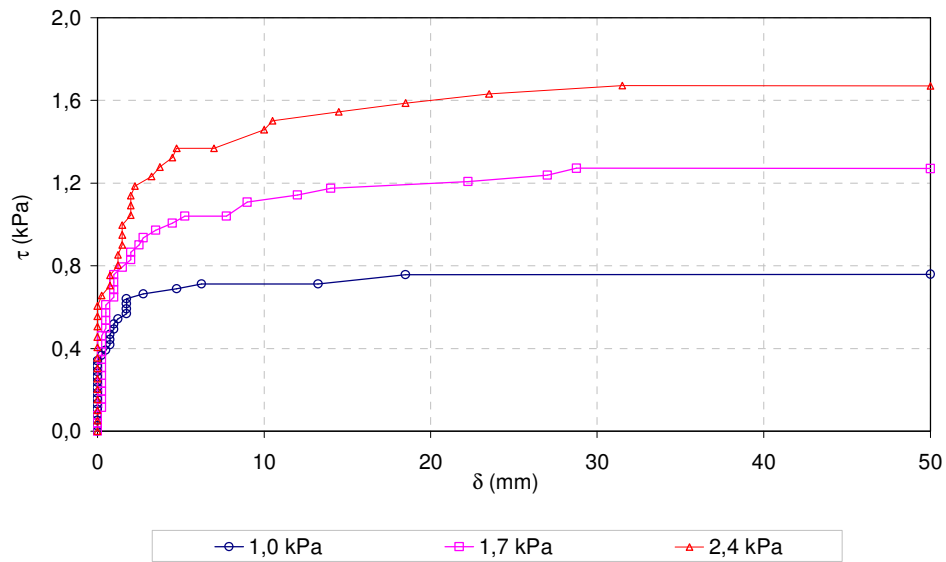


Figura 36 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-BR.
Ensaio de RP

A Figura 37 exibe a envoltória de resistência da interface BR-BR. Os valores obtidos foram: coesão (c) de 0 kPa e o ângulo de atrito (ϕ) de 40,7°.

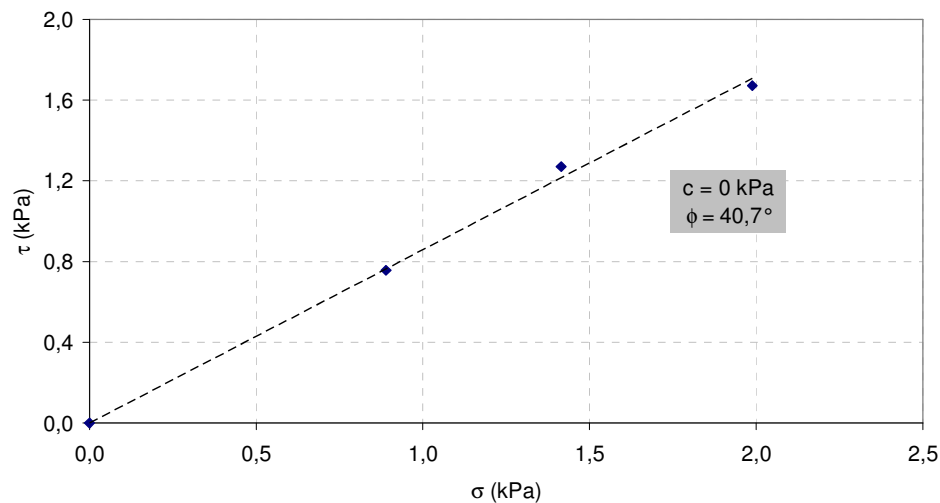


Figura 37 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio de RP

Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 15 resume os resultados dos ensaios de rampa da interface BR-GG, a Figura 38 apresenta graficamente estes resultados. Pode-se observar que o deslocamento na ruptura é menor para a tensão confinante intermediária e o acréscimo da tensão confinante corresponde em um aumento da resistência de interface, ou seja, aumento da tensão cisalhante. A diferença do ângulo de rampa da maior para a menor tensão confinante foi de 3°.

Este comportamento deve-se à possibilidade de rearranjo e imbricamento entre os grãos da brita.

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de Rampa para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (°)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	8,8	32	0,87	0,80	0,92	42,6
	1,7	7,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
	2,4	8,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0

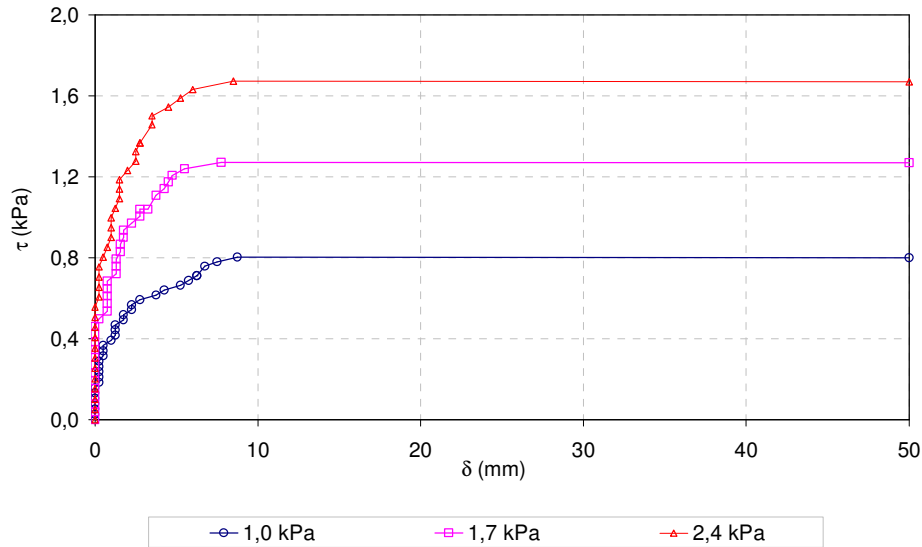


Figura 38 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GG. Ensaio de RP

A Figura 39 exibe a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os valores obtidos foram: adesão (a) de 0 kPa e o ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $40,9^\circ$.

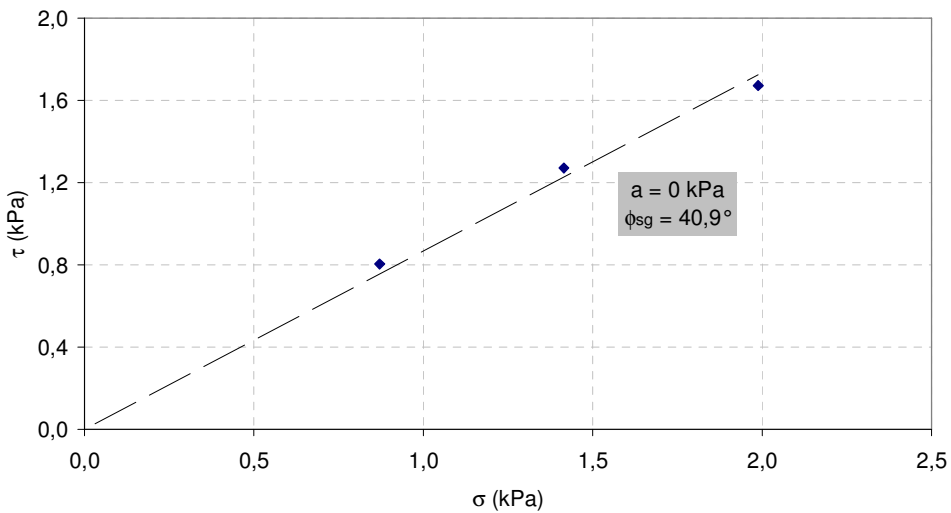


Figura 39 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio de Rampa

Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 16 apresenta os resultados dos ensaios mais representativos da interface ensaiada, para as três tensões confinantes distintas.

De acordo com a Figura 40 pode-se observar que o aumento da tensão confinante tem como resposta o acréscimo do ângulo de atrito e do deslocamento até a ruptura. A diferença do ângulo de rampa e do deslocamento entre a maior e a menor tensão confinante foi de 6° e 11 mm, respectivamente. Por sua vez, a tensão cisalhante obteve um acréscimo correspondente ao aumento da resistência da interface. Este comportamento evidencia um entrosamento entre as partículas do solo e rearranjo dos grãos.

Nota-se que o valor de ϕ_{sec} é constante para as três tensões confinantes, sugerindo uma envoltória de resistência reta, para estes baixos valores de confinamento.

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de Rampa para as interfaces BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} ($^\circ$)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} ($^\circ$)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GM	1,0	0,3	15	0,99	0,39	0,39	21,3
	1,7	8,5	19	1,65	0,65	0,39	21,3
	2,4	11,3	21	2,30	0,9	0,39	21,3

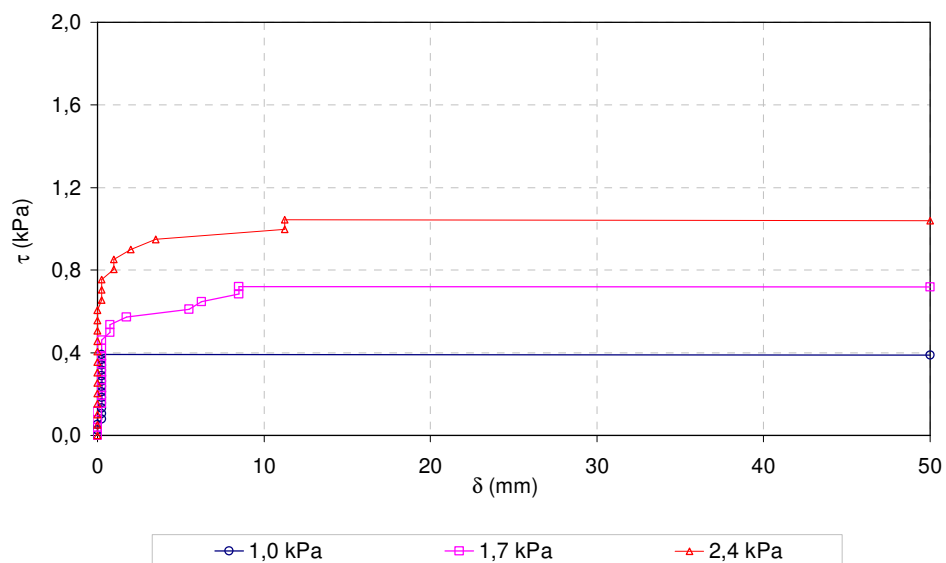


Figura 40 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GM. Ensaio de RP

A Figura 41 exibe a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os valores obtidos foram: adesão (a) de 0 kPa e o ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $24,1^\circ$.

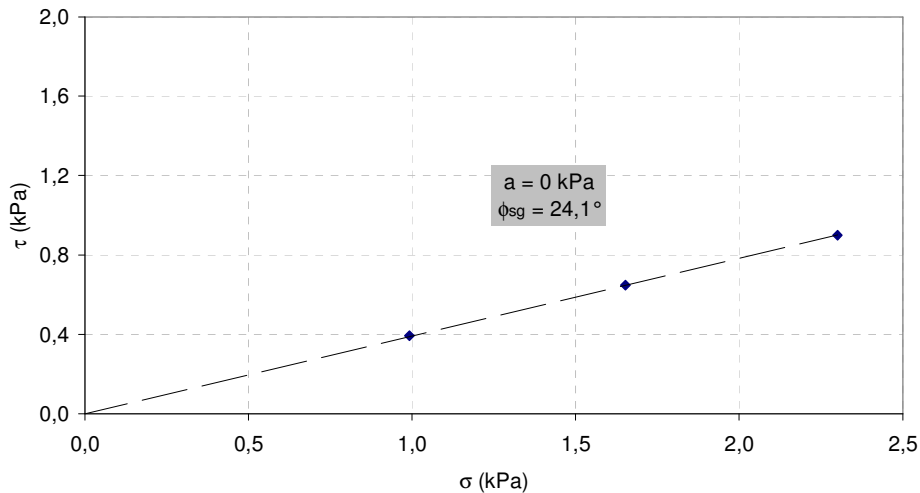


Figura 41 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio de RP

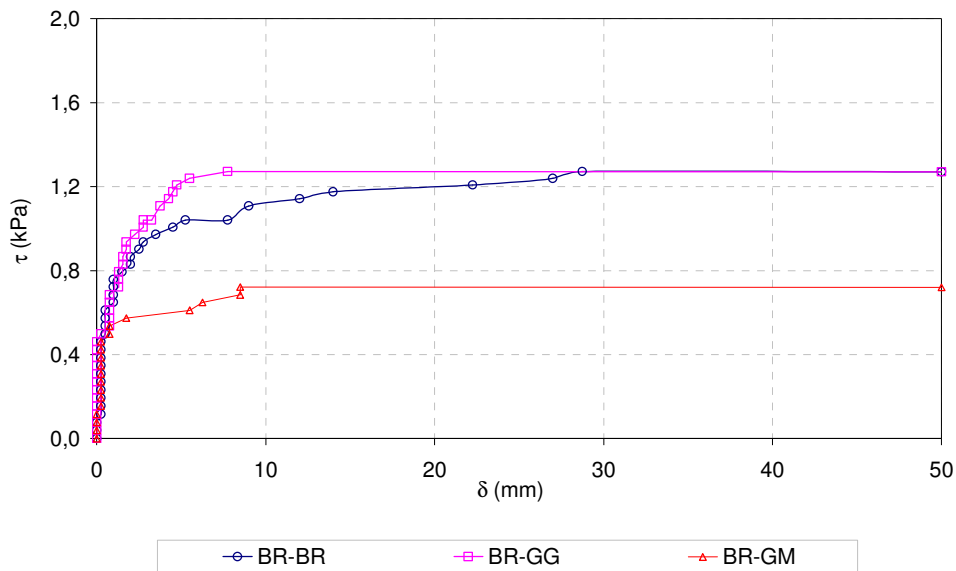
4.4.2. Influência do Geossintético

A Tabela 17 apresenta os resultados dos ensaios das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Para a mesma tensão confinante comparou-se a influência da inserção de cada tipo de geossintético. As interfaces BR-BR e BR-GG apresentaram praticamente o mesmo ângulo de rampa e o mesmo deslocamento na ruptura, enquanto que para a interface BR-GM o ângulo e o deslocamento foram menores. Isto pode ser explicado em função da estrutura do geossintético, a geomembrana perde resistência por possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo nas aberturas da malha.

A Figura 42 revela as curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) dos ensaios mais representativos de cada interface sob a tensão confinante intermediária ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Vale ressaltar que o gráfico do comportamento das interfaces para as demais tensões confinantes (máxima e mínima) é análogo à tensão intermediária.

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de Rampa para interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	α_{rup} (°)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR		18,5	30	0,89	0,76	0,85	40,4
BR-GG	1,0	8,8	32	0,87	0,80	0,92	42,6
BR-GM		0,3	15	0,99	0,39	0,40	21,8
BR-BR		28,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
BR-GG	1,7	7,8	35	1,42	1,27	0,90	42,0
BR-GM		8,5	19	1,63	0,72	0,44	23,8
BR-BR		31,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0
BR-GG	2,4	8,5	35	1,99	1,67	0,84	40,0
BR-GM		11,3	21	2,27	1,04	0,46	24,7

Figura 42 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR;BR-GG e BR-GM ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio de RP

A Figura 43 apresenta as envoltórias de resistência das interfaces, nota-se que a interface BR-GM apresenta menor resistência quando comparada às interfaces BR-BR e BR-GG. Este comportamento pode ser explicado pelo tipo de estrutura do geossintético, onde a interface da geomembrana perde resistência em virtude da sua superfície lisa, ao contrário da interface com geogrelha, que conta com o efeito do imbricamento do solo com as aberturas da malha.

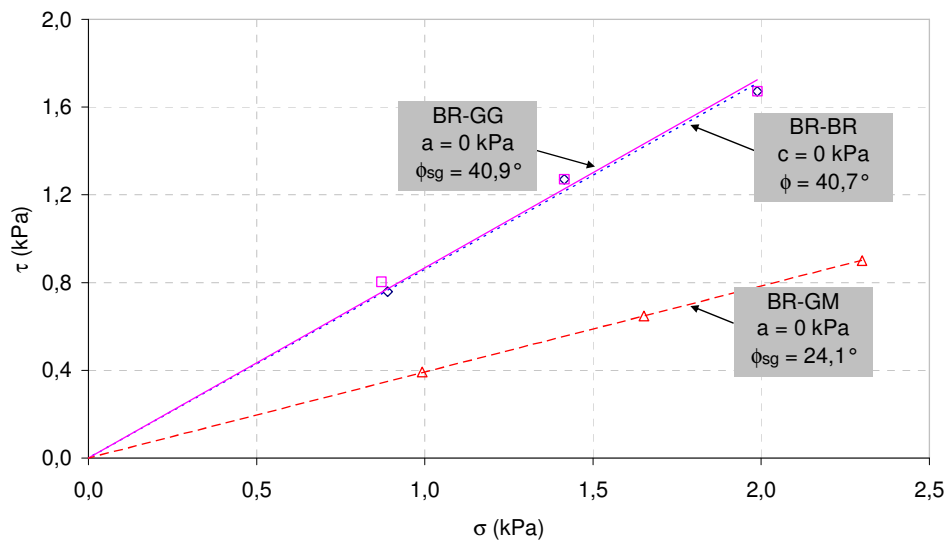


Figura 43 - Envoltórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio RP

4.4.3. Eficiência

A Tabela 18 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) de cada interface, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no ensaio de rampa. Pode-se concluir que as interfaces com geogrelha possuem valores de E_ϕ maiores do que as interfaces com geomembrana, ou seja, a interface BR-GG possui maior resistência ao cisalhamento do que a interface BR-GM o que comprova a função destes dois geossintéticos.

Para todas as interfaces a E_c foi nula devido à coesão nula da brita.

Tabela 18 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de Rampa

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (°)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,0	40,9	0,0	1,0
BR-GM	0,0	24,1	0,0	0,4

4.5. Ensaio Cisalhamento Direto Convencional – CC

Os resultados do ensaio CC serão apresentados e analisados avaliando a influência da tensão confinante e a inserção dos geossintéticos para cada tipo de interface: solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembrana.

4.5.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

A Tabela 19 e a Figura 44 apresentam os resultados dos ensaios BR-BR. Pode-se observar que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante necessária para romper a interface, chegando a aproximadamente 1kPa de diferença entre a menor e a maior tensão cisalhante na ruptura. Este comportamento, possivelmente, deve-se ao processo de escorregamento, rolagem dos grãos entre si e rearranjo, aumentando a resistência de interface.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Convencional para a interface BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	δ_{rup} (mm)	M_{rup} (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	8,0	34,1	1,02	0,78	0,77	33,6
	1,7	5,0	64,7	1,72	1,31	0,76	23,7
	2,4	8,5	85,2	2,42	1,77	0,73	24,7

A Figura 45 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-BR, tendo sido obtidos os seguintes parâmetros: coesão $c = 0$ kPa e ângulo de atrito de $36,6^\circ$.

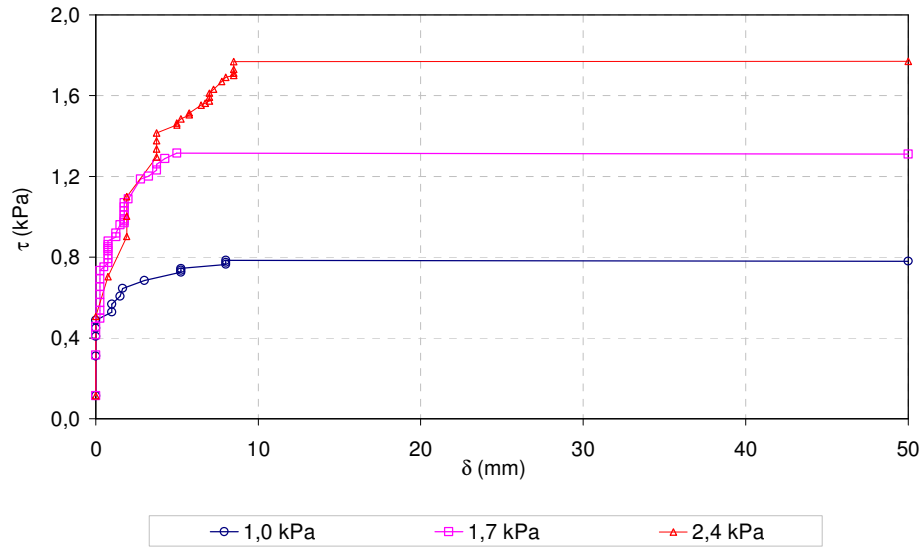


Figura 44 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-BR. Ensaio CC

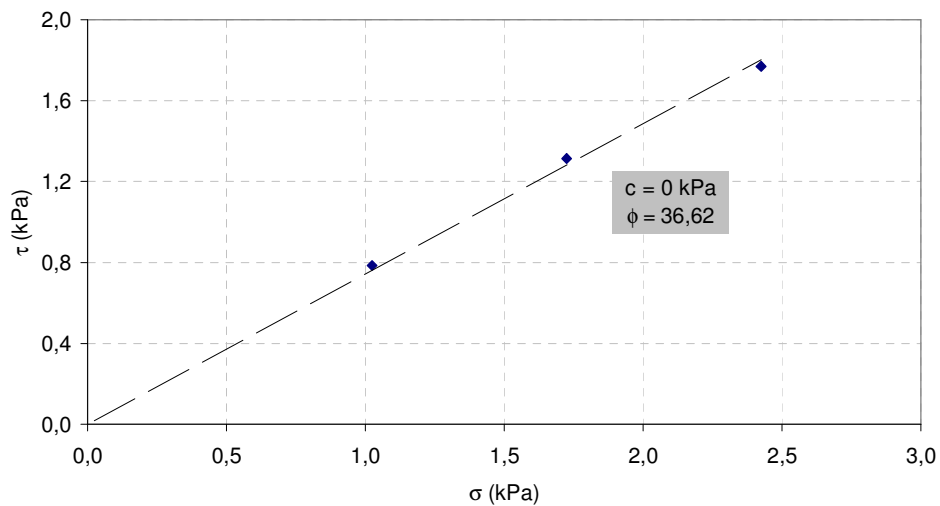


Figura 45 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio CC

Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 20 resume os resultados dos ensaios de cisalhamento direto da interface BR-GG para as três tensões confinantes. A Figura 46 compara e ilustra os resultados mais representativos.

Verifica-se através dos crescentes valores de tensão cisalhante, que quanto maior a tensão confinante, maior a resistência da interface, este comportamento deve-se, possivelmente, ao rearranjo e travamento entre os grãos.

O valor de ϕ_{sec} diminui com o aumento da tensão confinante, este comportamento sugere uma envoltória curva, um comportamento real da resistência dos grãos de brita.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	5,5	40,1	1,02	0,88	0,86	40,7
	1,7	2,3	66,0	1,72	1,37	0,80	38,6
	2,4	6,5	92,0	2,42	1,92	0,79	38,3

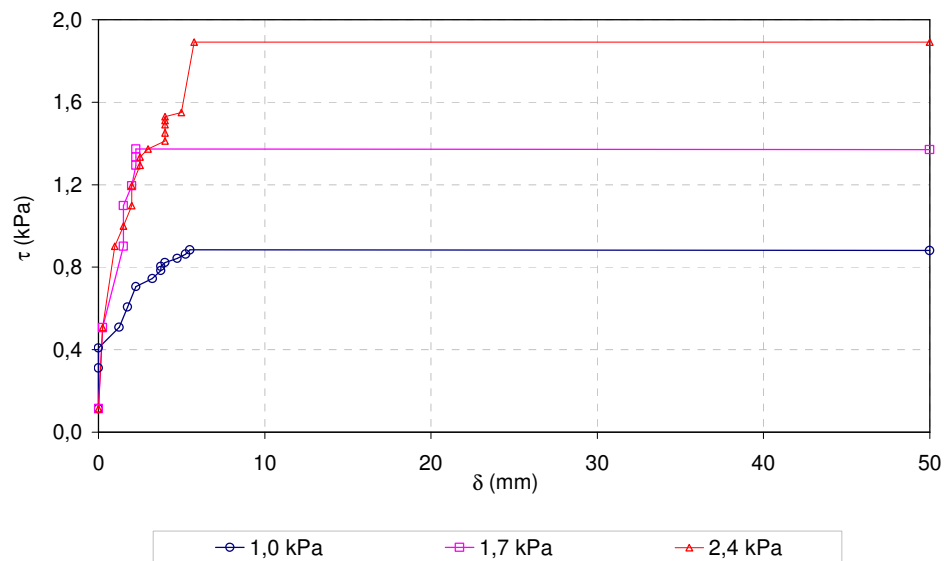


Figura 46 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GG. Ensaio CC

A Figura 47 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os valores obtidos foram: adesão (a) de 0 kPa e ângulo de atrito de 38,4°.

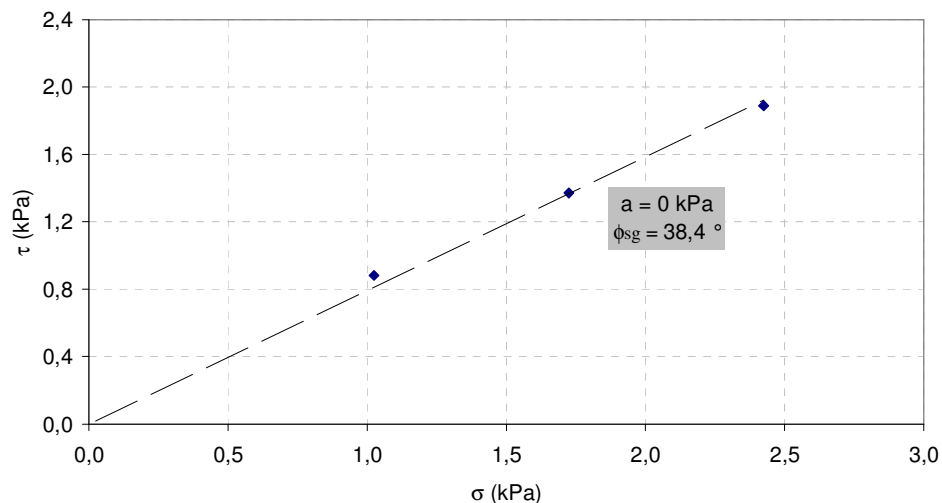


Figura 47 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CC.

Interface Solo-Geomembrana

A Tabela 21 e a Figura 48 resumem os resultados obtidos dos ensaios. Pode-se observar que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante até a ruptura. Este comportamento pode ser explicado devido o rearranjo dos grãos e ao imbricamento que provocam um aumento do atrito de interface. O deslocamento, neste caso, diminui com o aumento da tensão confinante.

Tabela 21 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
	1,0	28,5	25,00	1,02	0,59	0,57	31,5
BR-GM	1,7	12,5	39,00	1,72	0,86	0,50	29,6
	2,4	8,0	58,70	2,42	1,23	0,51	27,0

A Figura 49 mostra a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão nula e ângulo de atrito de 27,1°.

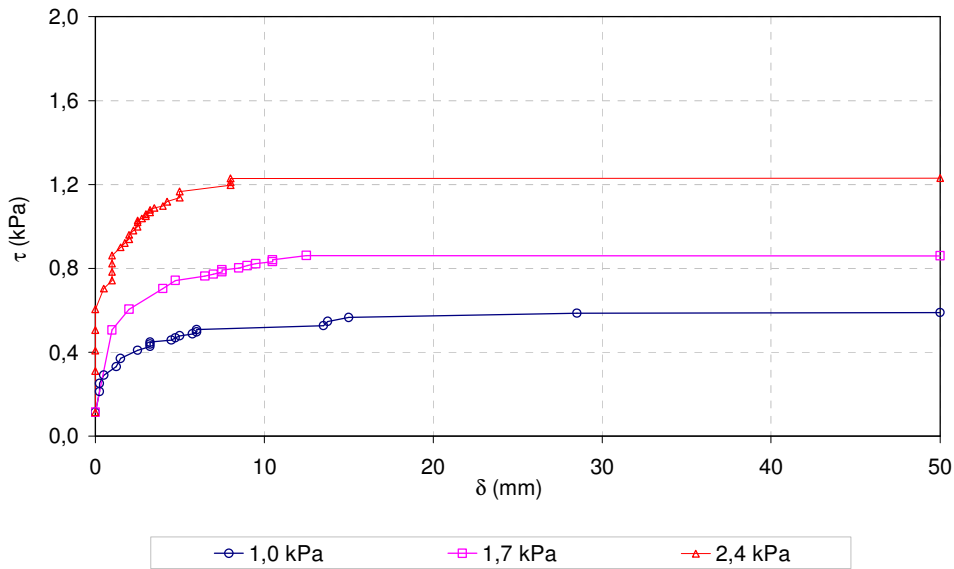


Figura 48 - Curvas tensão vs deslocamento para a interface BR-GM. Ensaio CC

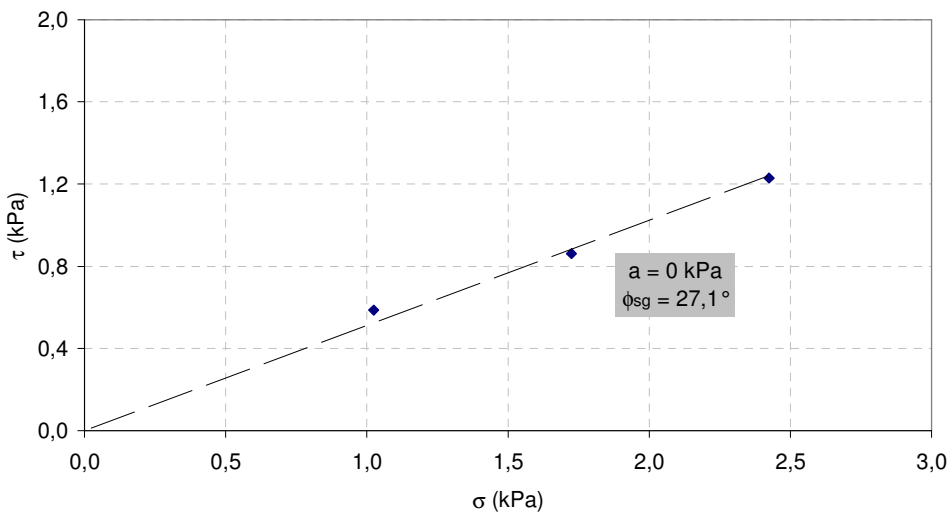


Figura 49 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio Cisalhamento Direto

4.5.2. Influência do Tipo Geossintético

A Tabela 22 e a Figura 50 apresentam os resultados dos ensaios das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Pode-se observar que, para uma mesma tensão confinante, as interfaces BR-BR e BR-GG possuem valores da tensão cisalhante maiores do que para a interface BR-GM. Os maiores valores observados são para interface BR-GG, chegando a 42° . Este comportamento deve-

se às características superficiais do geossintético. A geomembrana apresenta uma superfície lisa e polida, sem imbricamento com os grãos de solo, e por consequência, com menor resistência. Por sua vez, a geogrelha tem uma área aberta considerável, propiciando o contato solo-solo, além das tiras longitudinais e transversais apresentarem uma superfície rugosa.

Tabela 22 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Convencional ara as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR		8,0	30,0	0,89	0,76	0,85	40,4
BR-GG	1,0	5,5	40,1	1,02	0,88	0,86	40,7
BR-GM		28,5	25,0	1,02	0,59	0,57	29,7
BR-BR		5,0	64,7	1,72	1,31	0,76	37,2
BR-GG	1,7	2,3	66,0	1,72	1,37	0,80	42,0
BR-GM		12,5	39,00	1,72	0,86	0,50	23,8
BR-BR		8,5	85,2	2,42	1,77	0,73	40,0
BR-GG	2,4	6,5	92,0	2,42	1,92	0,79	40,0
BR-GM		8,0	58,70	2,42	1,23	0,51	24,7

Na Figura 51, pode-se observar que as interfaces BR-BR e BR-GG têm valores maiores de parâmetros de resistência do que a interface BR-GM, o que condiz com a respectiva função de resistência ao cisalhamento da geogrelha e a função de revestimento da geomembrana.

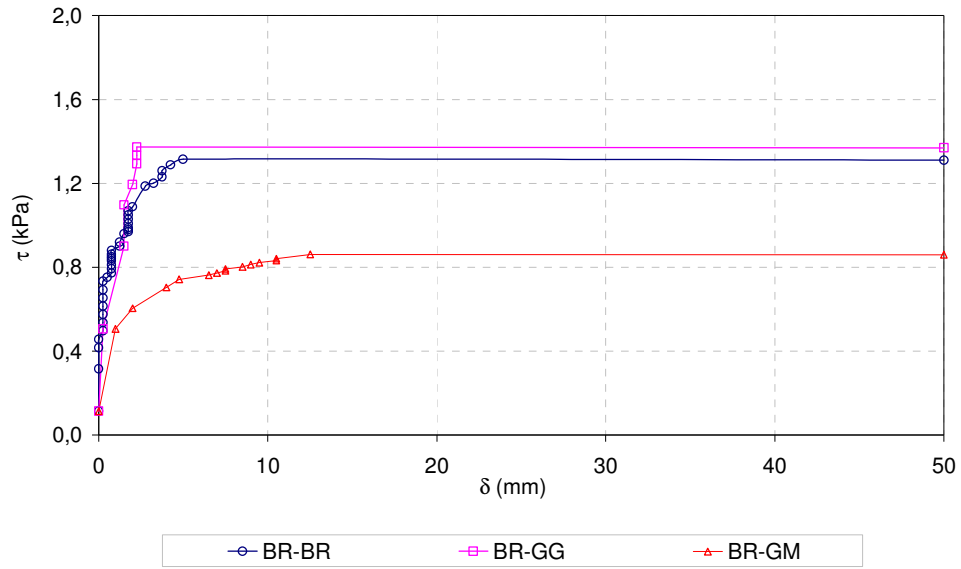


Figura 50 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio CC

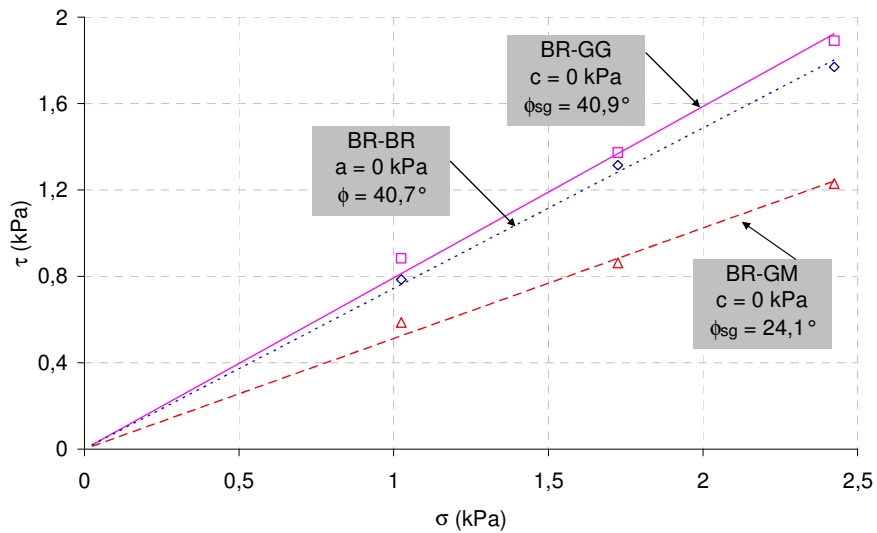


Figura 51 - Envolvórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio CC

4.5.3. Eficiência das Interfaces

A Tabela 23 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) de cada interface, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no ensaio de rampa. Pode-se concluir que a interface utilizando geogrelha possui valores de E_ϕ maiores do que as interfaces utilizando geomembrana. Como o esperado, pois a função da geomembrana é de revestimento e não de reforço como a malha de geogrelha.

Para todas as interfaces a E_c foi nula devido à coesão nula da brita.

Tabela 23 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} (°)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,0	38,4	0,0	1,0
BR-GM	0,0	27,1	0,0	0,7

4.6. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a 4,5° – (CI-4,5)

Os resultados do ensaio CC-4,5 serão apresentados e analisados avaliando a influência da tensão confinante na interface solo-geomembra.

4.6.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Geomembrana

Os resultados dos ensaios de rampa da interface BR-GM foram resumidos na Tabela 24 e apresentados graficamente na Figura 52. Observa-se que quanto maior a tensão cisalhante necessária para mobilizar o conjunto até a ruptura da interface. Este comportamento reflete o efeito do entrosamento entre os grãos e acomodação das partículas. Percebe-se que o deslocamento mínimo deu-se para a tensão confinante intermediária.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto (4,5°) para interface BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GM	1,0	22,7	15,6	1,02	0,54	0,53	27,9
	1,7	7,7	22,1	1,72	0,72	0,42	22,8
	2,4	16,2	41,7	2,42	1,16	0,48	25,6

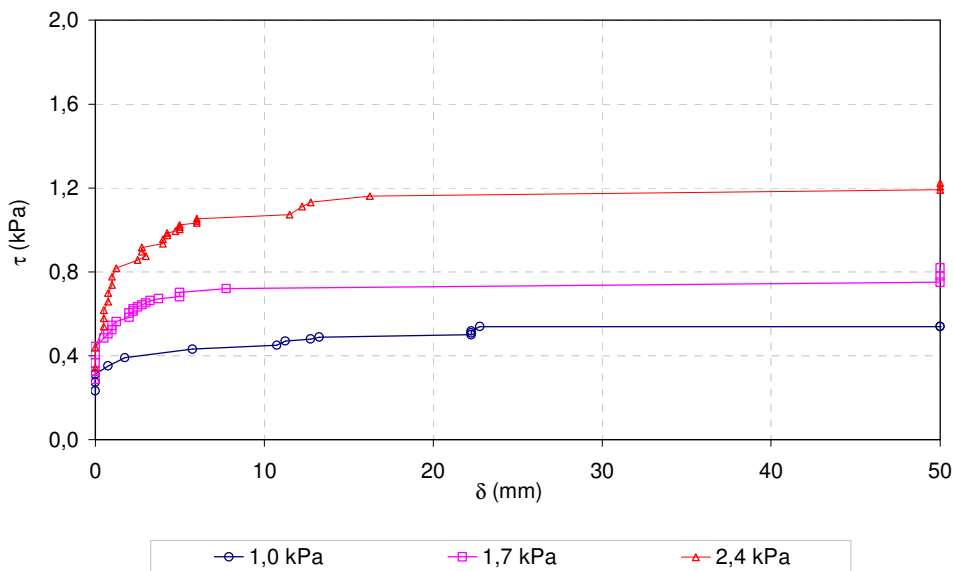


Figura 52 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GM. Ensaio CI-4,5

A Figura 53 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os parâmetros obtidos foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de 25,0°.

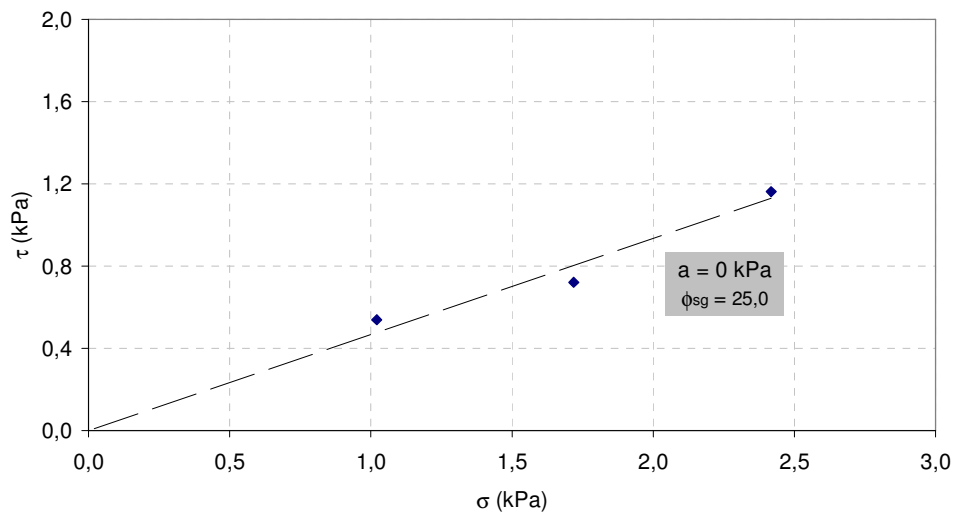


Figura 53 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio CI-4,5

4.7.

Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a $9,0^\circ$ – (CI-9,0)

As análises serão apresentadas considerando a influência da tensão confinante e a inserção dos geossintéticos para cada tipo de interface: solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembra.

4.7.1.

Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios CI-9,0 da interface BR-BR foram resumidos na Tabela 25 e apresentados graficamente na Figura 54. Pode-se observar que o aumento da tensão confinante acarreta um acréscimo da tensão cisalhante. Este comportamento deve-se à possibilidade do imbricamento entre os grãos da brita. Nota-se que o menor deslocamento na ruptura deu-se para a tensão confinante intermediária.

Percebe-se que o valor de ϕ_{sec} diminui com o aumento da tensão confinante, indicando que a envoltória de resistência tende a ser curva, porém, para análise adota-se a envoltória reta. Contrariando a conclusão de Lopes (2001)

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (9,0°) para a interface BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	7,7	27,0	1,01	0,88	0,87	41,0
	1,7	6,7	51,0	1,70	1,46	0,86	40,7
	2,4	11,0	72,5	2,39	2,00	0,83	39,7

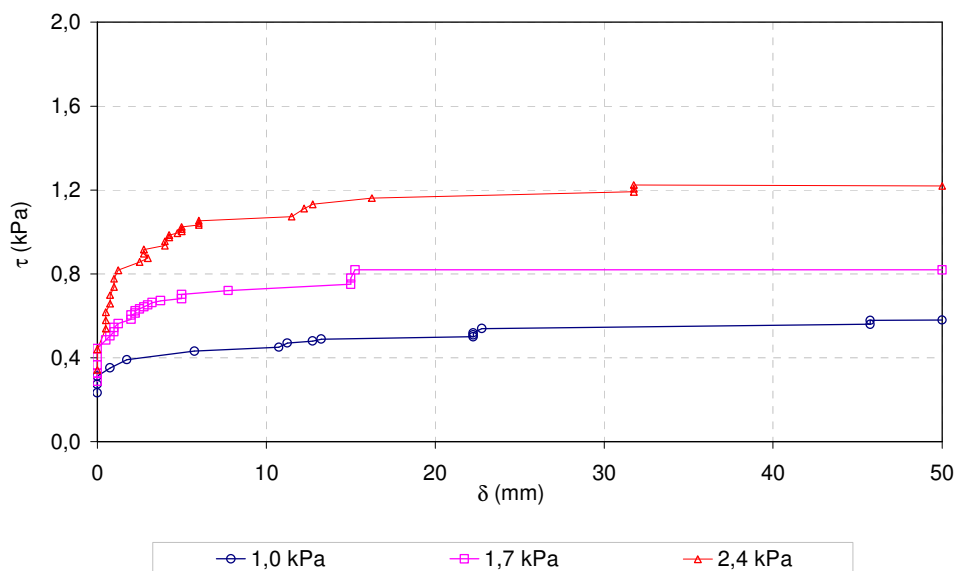


Figura 54 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-BR. Ensaio CI-9,0

A Figura 54 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-BR. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ) de 40,2°.

Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 26 resume os resultados dos ensaios da interface BR-GG. Verifica-se que, como nas interfaces anteriormente apresentadas, o aumento da tensão confinante provoca a elevação dos valores dos deslocamentos e dos ângulos de rampa na ruptura. Este comportamento possivelmente é decorrente do rearranjo entre os grãos e imbricamento da brita com a malha da geogrelha.

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} ($^{\circ}$)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	4,5	22,0	1,01	0,74	0,74	36,5
	1,7	6,0	49,5	1,70	1,42	0,84	40,0
	2,4	8,3	81,0	2,39	2,10	0,88	41,3

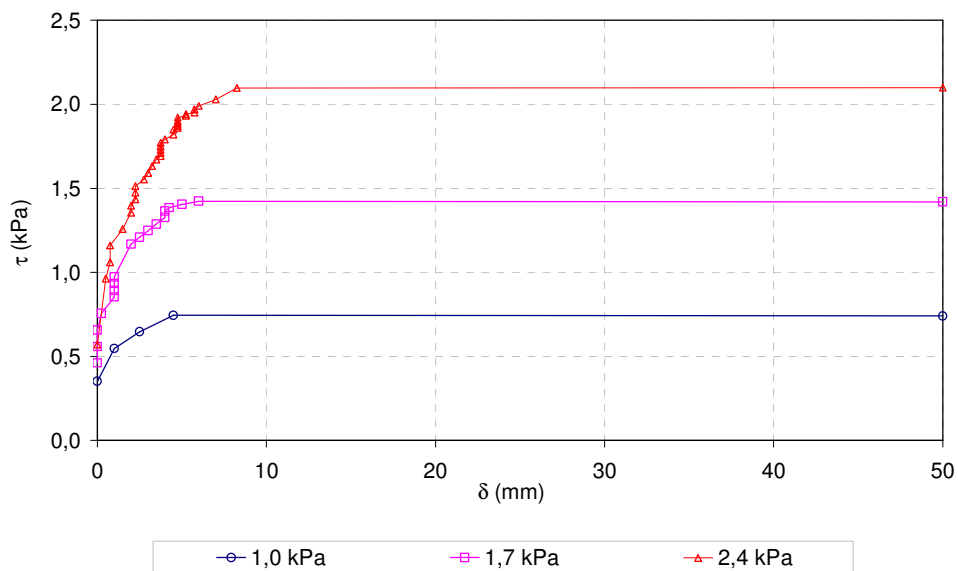


Figura 55 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GG. Ensaio CI-9,0

A Figura 56 exibe a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $40,3^{\circ}$.

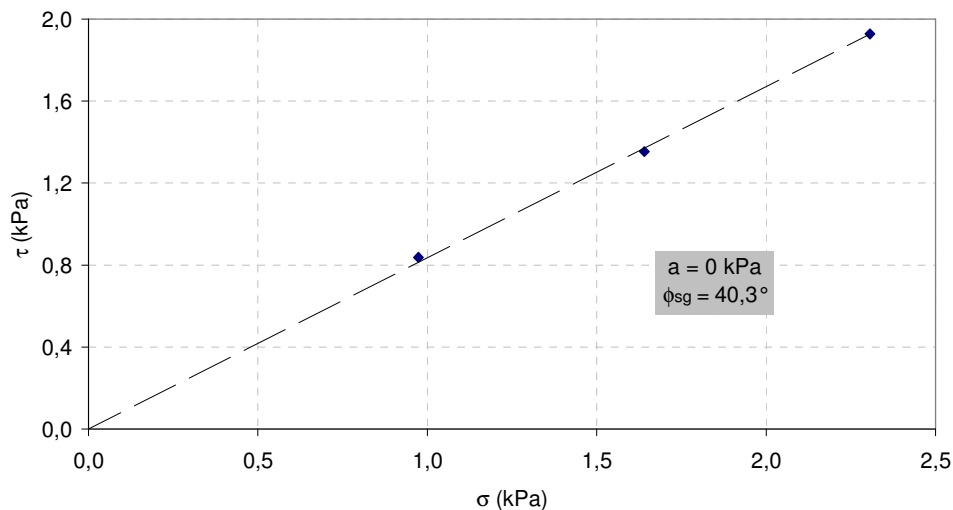


Figura 56 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CI-9,0

Interface Solo-Geomembrana

Os resultados obtidos no ensaio CI-9,0 para a interface BR-GM estão resumidos na Tabela 27. Pode-se observar que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante aplicada até a ruptura e maior o deslocamento. Este comportamento deve-se ao entrosamento e imbricamento entre os grãos. Nota-se um decréscimo do ϕ_{sec} , isto indica uma tendência à envoltória curva, entretanto, considera-se para análise, envoltória de resistência reta.

A Figura 57 compara os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado ($9,0^\circ$) na interface BR-GM em função dos níveis de confinamento.

Tabela 27 - Resultados dos ensaios CI-9,0 para a interface BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GM	1,0	31,2	8,0	1,01	0,51	0,50	25,6
	1,7	22,5	18,5	1,70	0,82	0,48	25,6
	2,4	27,8	26,6	2,39	1,09	0,46	24,7

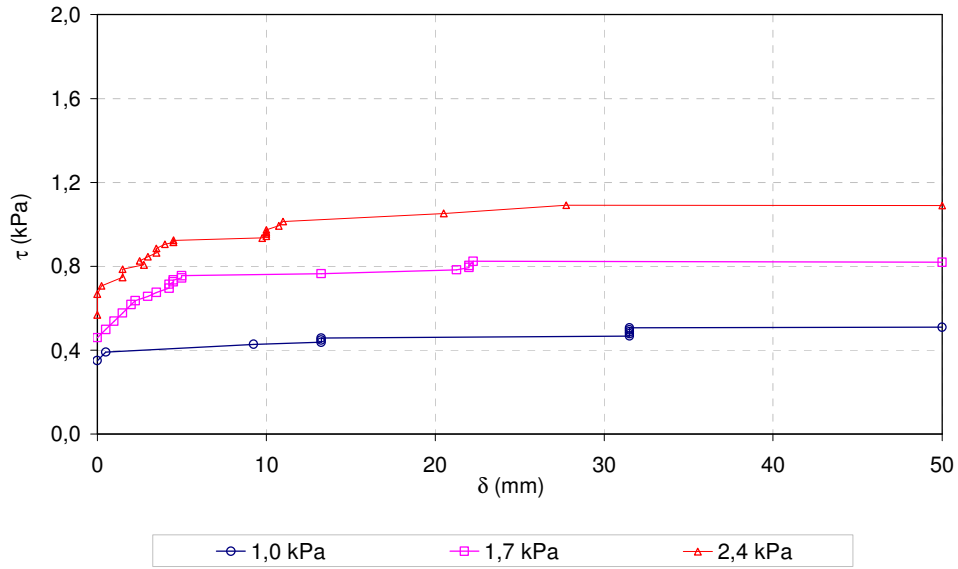


Figura 57 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para a interface BR-GM. Ensaio CI-9,0

A Figura 58 apresenta a envoltória de resistência da interface BR-GM. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito (ϕ_{sg}) de $25,1^\circ$.

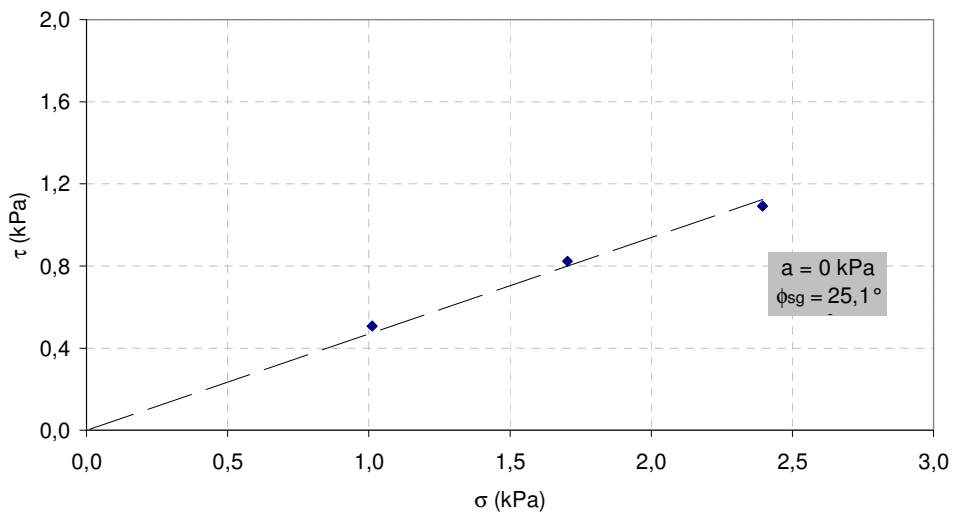


Figura 58 - Envoltória de resistência da interface BR-GM. Ensaio CI-9,0

4.7.2. Influência do Geossintético

A Tabela 28 aponta os resultados dos ensaios CI-9,0 das interfaces BR-BR; BR-GG E BR-GM, pode-se analisar a influência da inserção dos geossintéticos.

A caixa superior da interface BR-GG desliza mais lentamente até a ruptura do que na interface BR-BR. O imbricamento dos grãos da brita na malha do geossintético provavelmente aumenta a tensão cisalhante na ruptura, necessitando de uma força maior para mobilizar o deslizamento da caixa superior em relação à inferior. A Figura 59 representa os resultados comparativos entre as três interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM.

A inserção da geomembrana diminui a resistência ao cisalhamento da interface. Os deslocamentos na ruptura são maiores na interface BR-GM do que na interface BR-BR e BR-GG. Este comportamento deve-se à superfície lisa da geomembrana, que se encontra superfície de ruptura imposta no ensaio, ou seja, entre a caixa superior e a inferior. O imbricamento entre os grãos da brita e a geomembrana é menor do que na malha aberta da geogrelha. Nas duas interfaces, BR-BR e BR-GG, os deslocamentos são menores nas tensões confinantes intermediárias. A Figura 60 representa os resultados comparativos entre as três envoltórias de resistência BR-BR; BR-GG e BR-GM.

Tabela 28 - Resultados dos ensaios CI-9,0 para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	M (kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR		7,7	27,0	1,01	0,88	0,87	41,0
BR-GG	1,0	4,5	22,0	1,01	0,74	0,74	36,5
BR-GM		31,2	8,0	1,01	0,51	0,50	25,6
BR-BR		6,7	51,0	1,70	1,46	0,86	40,7
BR-GG	1,7	6,0	49,5	1,70	1,42	0,84	40,0
BR-GM		22,5	18,5	1,70	0,82	0,48	25,6
BR-BR		11,0	72,5	2,39	2,00	0,83	39,7
BR-GG	2,4	8,2	81,0	2,39	2,10	0,88	41,3
BR-GM		27,8	26,6	2,39	1,09	0,46	24,7

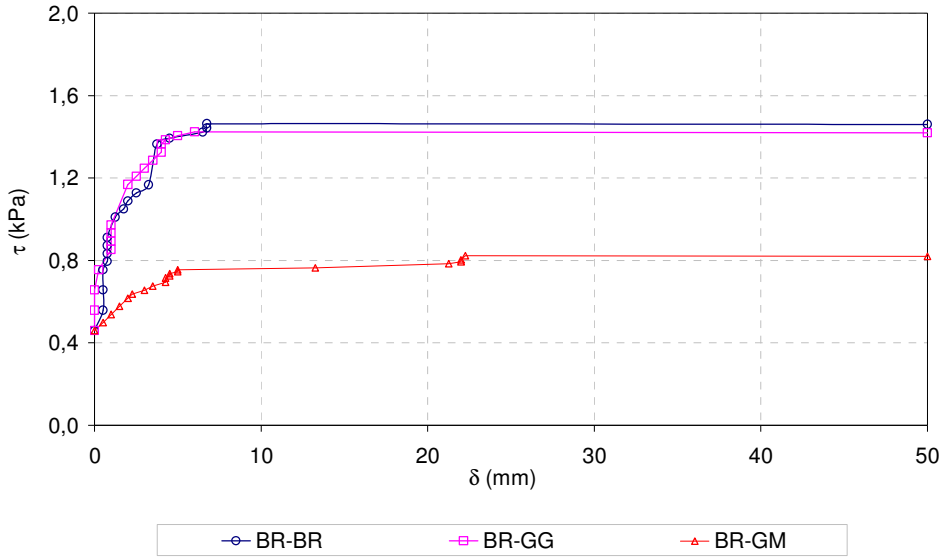


Figura 59 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. ($\sigma_n = 1,7$ kPa). Ensaio CI-9,0

Percebe-se que as interfaces BR-BR e BR-GG têm valores nitidamente maiores de parâmetros de resistência do que a interface BR-GM o que condiz com a respectiva função de resistência ao cisalhamento da geogrelha e a função de revestimento da geomembrana.

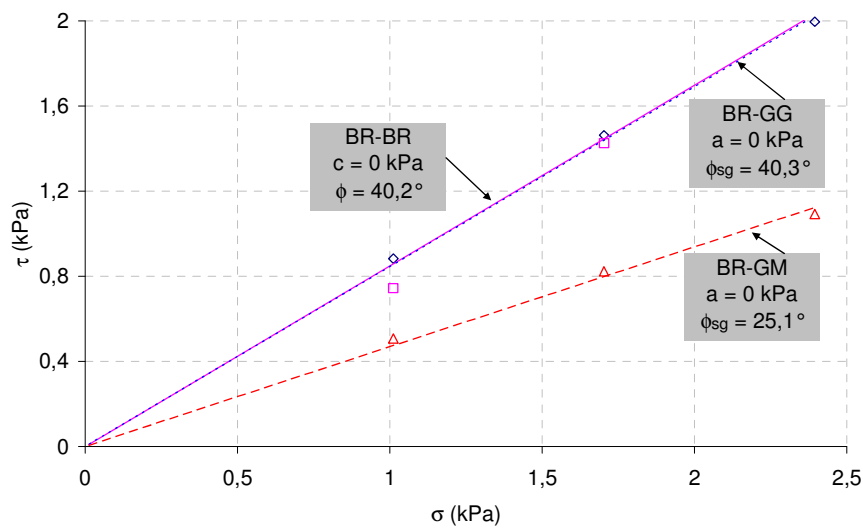


Figura 60 - Envolvórias de resistência das interfaces BR-BR; BR-GG e BR-GM. Ensaio CI-9,0

4.7.3. Eficiência das Interfaces

A Tabela 29 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) de cada interface, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no Cisalhamento Direto Inclinado ($9,0^\circ$). Pode-se concluir que as interfaces com geogrelha possuem valores de E_ϕ maiores do que as interfaces com geomembrana, ou seja, a interface BR-GG possui maior resistência ao cisalhamento do que a interface BR-GM o que comprova a função destes dois geossintéticos.

Para todas as interfaces, o valor de E_c foi nulo devido à coesão nula da brita.

Tabela 29 – Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio CI-9,0

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} ($^\circ$)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,0	40,3	0,0	1,00
BR-GM	0,0	25,1	0,0	0,62

4.8. Ensaio Cisalhamento Direto Inclinado a $18,0^\circ$ – (CI-18,0)

As análises serão apresentadas considerando a influência da tensão confinante e a inserção dos geossintéticos para cada tipo de interface: solo-solo e solo-geomembrana.

4.8.1. Influência da Tensão Confinante

Interface Solo-Solo

Os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado ($18,0^\circ$) utilizando a interface BR-BR estão resumidos e apresentados na Tabela 30 e na Figura 61. Observa-se que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante e maior o deslocamento até a ruptura. Este comportamento pode se explicado através da análise do efeito do imbricamento e rearranjo estrutural dos grãos.

Tabela 30 - Resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (18,0°) para a interface BR-BR

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	W (Kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-BR	1,0	6,0	13,02	0,97	0,84	0,86	40,7
	1,7	11,7	46,50	1,64	1,35	0,83	39,7
	2,4	15,0	28,25	2,31	1,93	0,84	40,0

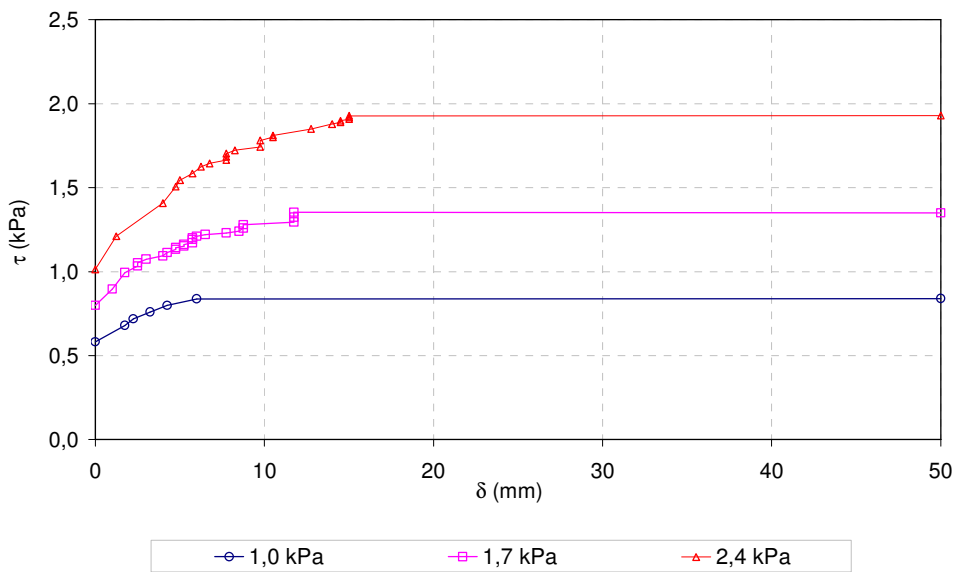


Figura 61 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-BR. Ensaio CI-18,0

A Figura 62 mostra a envoltória de resistência da interface BR-BR. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: coesão (c) nula e ângulo de atrito (ϕ) de 39,9°.

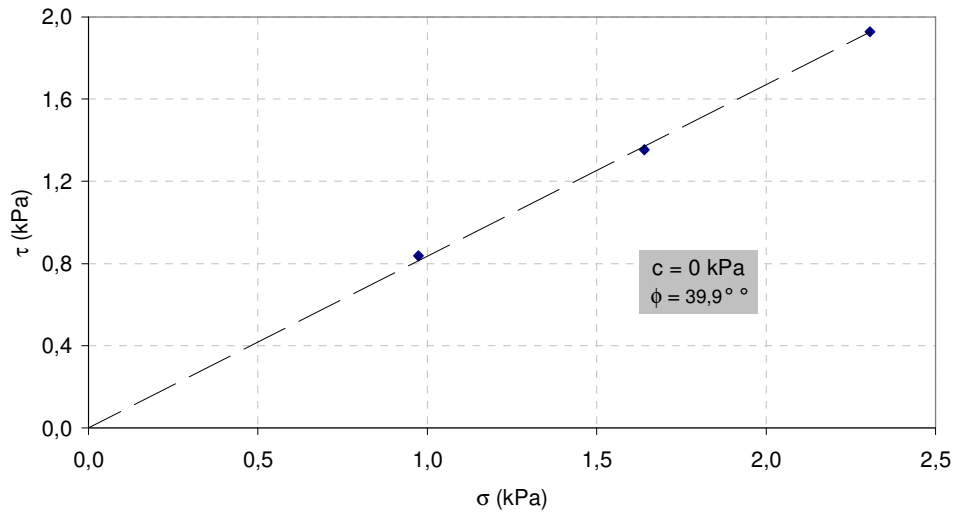


Figura 62 - Envoltória de resistência da interface BR-BR. Ensaio CI -18,0

Interface Solo-Geogrelha

Os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto Inclinado (18,0°) utilizando a interface BR-GG estão resumidos e apresentados na Tabela 31 e na Figura 63. Observa-se que quanto maior a tensão confinante maior a tensão cisalhante na ruptura. Este comportamento reflete o efeito do imbricamento e rearranjo estrutural dos grãos. O deslocamento até a ruptura é mínimo para a tensão confinante intermediária.

O valor de ϕ_{sec} decresce com o aumento da tensão confinante, isto indica uma envoltória curva, mas consideraremos envoltória reta por aproximação.

Tabela 31 - Resultados dos ensaios CI-18,0 para a interface BR-GG

Interface	σ_n (kPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	W (Kg)	Tensões na Ruptura			ϕ_{sec} (°)
				σ_{rup} (kPa)	τ_{rup} (kPa)	τ/σ	
BR-GG	1,0	6,2	15,5	0,97	0,88	0,90	42,0
	1,7	4,0	32,1	1,64	1,43	0,87	41,0
	2,4	5,5	39,0	2,40	1,77	0,77	37,6

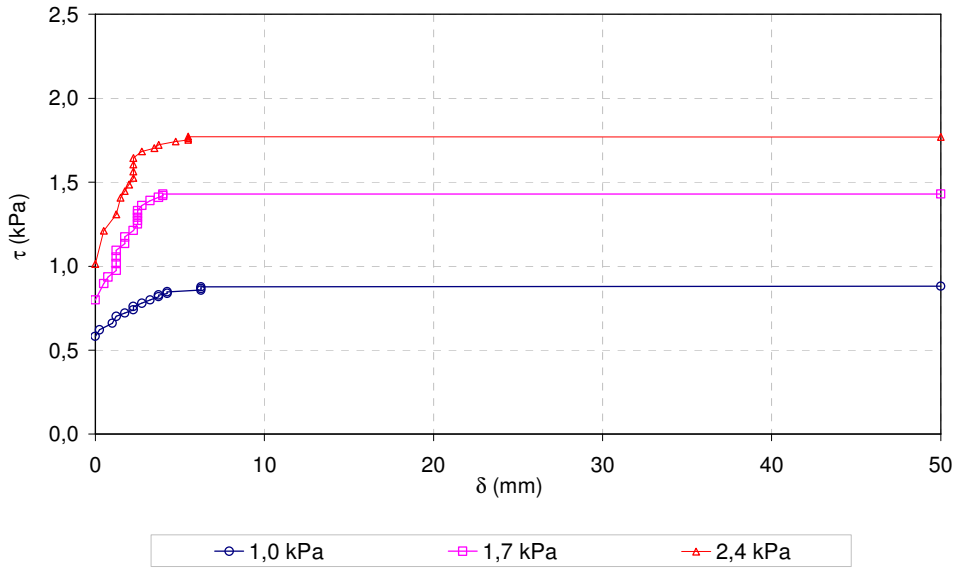


Figura 63 - Curvas deslocamento (δ) vs tensão cisalhante (τ) para as interfaces BR-GG. Ensaio CI-18,0

A Figura 64 revela a envoltória de resistência da interface BR-GG. Os parâmetros de resistência obtidos a partir dos três ensaios foram: adesão (a) nula e ângulo de atrito de $39,1^\circ$.

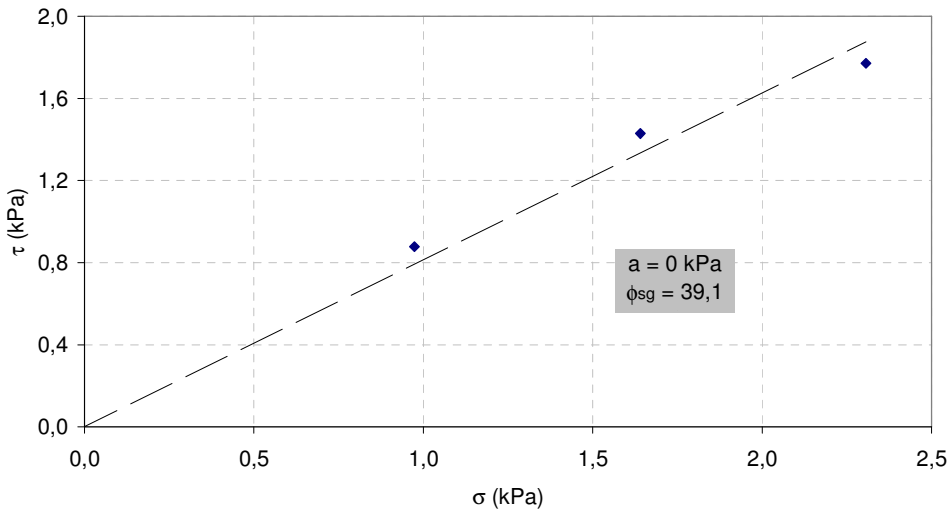


Figura 64 - Envoltória de resistência da interface BR-GG. Ensaio CI-18,0

4.8.2. Eficiência da Interface

A Tabela 32 revela os parâmetros de resistência e as eficiências de interação em função da adesão (E_c) e do ângulo de atrito (E_ϕ) da interface BR-GG, em função dos parâmetros de resistência do solo sem reforço no ensaio de Cisalhamento Direto Inclinado ($18,0^\circ$).

A interface apresentou E_c nula devido à coesão nula da brita

Tabela 32 - Parâmetros de resistência e eficiências de interação das interfaces. Ensaio de CI-18,0

Interface	a (kPa)	ϕ_{sg} ($^\circ$)	E_c	E_ϕ
BR-GG	0,00	$39,1^\circ$	0,0	0,99

4.9. Comparação dos Ensaio de Interface

As análises da influência do tipo de ensaio nos resultados de resistência das interfaces (solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembrana) foram realizadas em termos de envoltória de resistência. Estas envoltórias foram obtidas seguindo os procedimentos anteriores, através de, no mínimo, três ensaios com tensões normais diferentes.

4.9.1. Interface Solo-Solo

A Tabela 33 apresenta os resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18 para a mesma interface BR-BR. O objetivo é comparar o comportamento da mesma interface sob os diferentes ensaios do realizados no presente trabalho.

A Figura 65 apresenta os parâmetros obtidos através das envoltórias de resistência. Pode-se observar que o maior ângulo de atrito obtido foi no ensaio de RP e o menor ângulo de atrito deu-se para o ensaio CC, a diferença entre os valores dos parâmetros de resistência chega a $4,1^\circ$.

Tabela 33 - Resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18,0 para a interface BR-BR

Interface	Ensaio	Parâmetros de Resistência	
		c (kPa)	ϕ (°)
BR-BR	RP	0	40,7
	CC	0	36,6
	CI-9,0	0	40,2
	CI-18,0	0	39,9

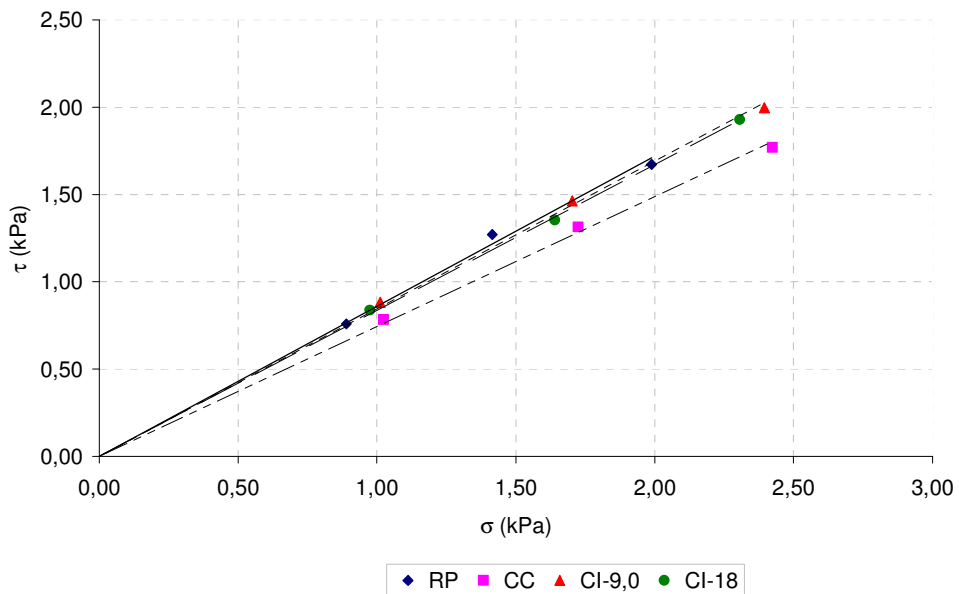


Figura 65 - Envoltórias de resistência da interface BR-BR. Ensaios de RP, CC, CI-9,0 e CI-18

4.9.2. Interface Solo-Geogrelha

A Tabela 34 apresenta os parâmetros obtidos através das envoltórias de resistência representadas na Figura 66. Pode-se dizer que os valores obtidos representam um decréscimo do ângulo de atrito de interface para os ensaios CC e CI-18,0. A diferença entre os valores dos parâmetros de resistência chega a 2,5° entre os ensaios de RP e CC.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios RP; CC; CI-9,0 e CI-18,0 para a interface BR-GG

Interface	Ensaio	Parâmetros de Resistência	
		a (kPa)	ϕ_{sg} (°)
BR-GG	RP	0	40,9
	CC	0	38,4
	CI (9,0°)	0	40,3
	CI (18,0°)	0	39,1

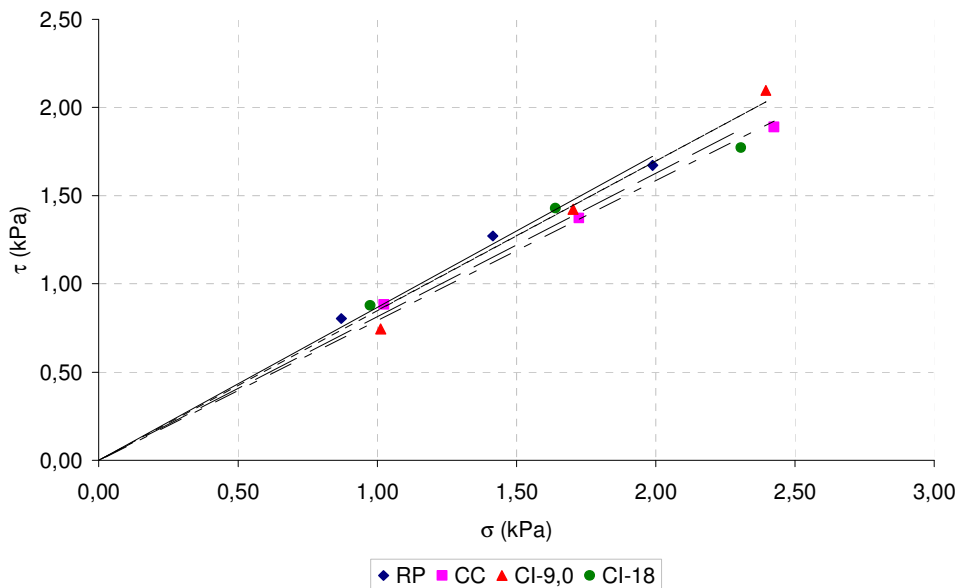


Figura 66 - Envoltórias de resistência da interface BR-GG. Ensaios de RP, CC, CI (9,0°) e CI (18°)

4.9.3. Interface Solo-Geomembrana

Os parâmetros de resistência apresentados na Tabela 35 foram obtidos através das envoltórias representadas na Figura 67. Pode-se dizer que os valores obtidos representam um decréscimo do ângulo de atrito de interface para os ensaios CC e RP. A diferença entre os valores dos parâmetros de resistência chegam a 3,0° entre os ensaios de CC e RP.

Tabela 35 - Resultados comparativos entre uma mesma interface submetidos aos diferentes ensaios

Interface	Ensaio	Parâmetros de Resistência	
		a (kPa)	ϕ_{sg} (°)
BR-GM	RP	0	24,1
	CC	0	27,1
	CI (4,5°)	0	26,7
	CI (9,0°)	0	25,1

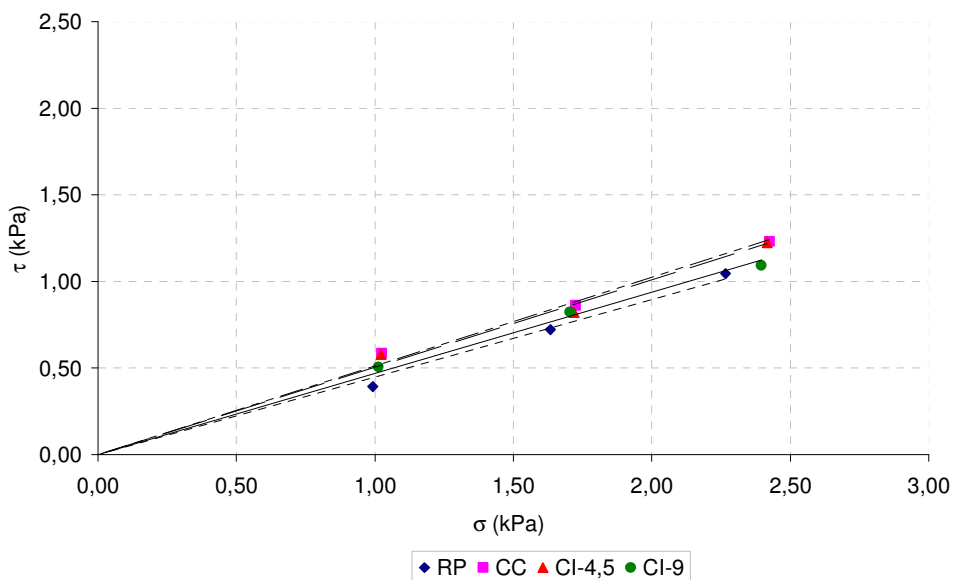


Figura 67 - Envoltórias de resistência da interface BR-GM. Ensaios de RP, CC, CI-4,5 e CI-9,0

Considerando todos os ensaios, pode-se perceber que para as interfaces BR-BR e BR-GG os ensaios de rampa apresentaram maiores valores de parâmetros de interface e os menores valores foram obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto convencional. Os ensaios de cisalhamento direto inclinado apresentam uma condição intermediária.

Uma das restrições do ensaio de rampa e cisalhamento direto inclinado é a vibração da plataforma provocada pelo basculamento do conjunto. Esta vibração pode ter ocasionado uma densificação da brita aumentando assim a resistência da interface e por isso os valores dos parâmetros de resistência tiveram maiores valores para os ensaios de RP e CI para as interfaces BR-BR e BR-GG. Ao

contrário destes ensaios, o ensaio CC não acarreta esta vibração, permanecendo o solo com a mesma densidade inicial.

Na interface BR-GM também ocorre a densificação durante os ensaios de rampa e cisalhamento direto inclinado, porém, esta densificação é reduzida em função da estrutura da geomembrana, já que o rearranjo entre os grãos é reduzido pela sua superfície lisa.

4.10. Considerações Finais

Este capítulo apresentou um estudo de resistência da interface solo geossintético em ensaios de rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado. Foi avaliada uma série de fatores que influenciam os resultados dos ensaios: a tensão confinante, a inserção do geossintético, o tipo de geossintético e o tipo de ensaio.

O programa experimental envolveu ensaios em dois tipos de geossintéticos (geogrelha e geomembrana) e um solo (brita). Foram realizados ensaios de interface solo-solo; solo-geogrelha e solo-geomembrana, em um equipamento que realiza os três tipos de ensaio, alterando apenas a sua configuração. Através destes ensaios foram obtidos os parâmetros de resistência e os valores de eficiência da interface.

Quanto à influência da tensão confinante, pode-se concluir que o aumento da σ_n tem como conseqüência maiores ângulos de atrito na ruptura em todas as interfaces ensaiadas. Com relação aos deslocamentos, não se pode tirar maiores conclusões, visto que algumas interfaces apresentam dispersões. Como a instrumentação utilizada para medir os deslocamentos tem precisão de 0,5mm, o efeito do aumento da tensão confinante não ficou bem definido.

Com relação à influência do tipo de geossintético, observou-se que as interfaces com geomembrana apresentaram menores ângulo de atrito na ruptura em todos os ensaios, quando comparadas às interfaces BR-BR e BR-GG. Isto pode ser explicado pela estrutura do geossintético, já que a geomembrana perde resistência pelo fato de possuir uma superfície lisa, ao contrário da geogrelha, que conta com o efeito do inter-travamento dos grãos com a abertura da malha da geogrelha.

Por fim, analisou-se os tipos de ensaio. Para as interfaces BR-BR e BR-GG os ensaios de RP obtiveram maiores valores de resistência do que para os ensaios CC. Para a interface BR-GM, o comportamento foi contrário, os ensaios de CC obtiveram maiores valores do que para RP. Para todas as interfaces os ensaios de CI apresentaram valores intermediários aos obtidos para RP e CC.

5 Conclusões

Os ensaios de rampa, cisalhamento direto e cisalhamento direto inclinado nas interfaces brita-brita e brita-geossintético, ainda são raramente reportados na literatura, pode-se dizer que os resultados foram consistentes com o tipo de material.

O programa experimental permitiu obter conclusões importantes sobre a influência da tensão confinante (1,0; 1,7 e 2,4kPa) , do tipo de geossintético (geogrelha e geomembrana) e os tipos de ensaio (rampa, cisalhamento direto convencional e inclinado).

Em resumo, as principais conclusões dos ensaios foram:

Influência da Tensão Confinante

Concluiu-se que o aumento da tensão confinante aumenta a resistência da interface em todos os ensaios. Este comportamento pôde ser explicado através da possibilidade de rearranjo e imbricamento entre os grãos.

No entanto, Lopes (2001) concluiu através dos ensaios de rampa, com diferentes geossintéticos, para três tensões de confinamento no início do ensaio (5kPa, 10kPa e 25kPa) em um solo arenoso ($D_{m\acute{a}x} = 2,0\text{mm}$) que à medida que a tensão confinante aumenta, verificou-se uma redução no valor do ângulo de atrito da interface solo-geossintético.

Esta divergência pode ser em função das baixas tensões de confinamento a que os presentes ensaios foram submetidos, o que levou a uma densificação da interface e possível aumento de resistência da interface. Do mesmo modo que Aguiar (2008) também concluiu em seus ensaios de rampa com areia, sob as baixas tensões confinantes de (1,4; 2,1; 2,8; 3,5 e 4,6 kPa) que o ângulo de rampa aumenta com o acréscimo da tensão confinante.

Influência do Tipo de Geossintético

A inserção da geogrelha altera o comportamento de ruptura das interfaces. A ruptura é progressiva, ao contrário das interfaces com geomembrana, que tende cada vez mais ao aparecimento de uma ruptura local. A abertura da malha da geogrelha facilita o travamento da brita, isto aumenta a tensão cisalhante e conseqüentemente aumenta a resistência da interface. Todavia, a superfície lisa e polida da geomembrana diminui a tensão cisalhante, resultando em baixos valores de resistência. Estas conclusões estão coerentes com as encontradas nos trabalhos reportados de Izgin e Wastin, 1998; Lima Jr, 2000; Mello, 2001; Lopes, 2001; Aguiar, 2003; Briançon *et al*; Rezende, 2005 e Aguiar, 2008.

Influência do Tipo de Ensaio

Para uma mesma interface, foi possível avaliar e comparar a influência do tipo de ensaio. Esta análise é importante, pois permite ajudar na escolha do ensaio mais adequado em função do tipo de geossintético e de sua solicitação na massa de solo

Sendo assim, os ensaios serviram para acurar o equipamento desenvolvido por Aguiar (2008), colaborando para sua campanha e análise de resultados.

5.1. Sugestões para Pesquisas Futuras

A seguir algumas sugestões para pesquisas futuras que darão continuidade ao estudo da interface solo-geossintético:

- 1) Estudo da resistência da interface em outros tipos de materiais geossintéticos com tipos variados de solos;
- 2) Análise de uma base rígida para apoio do geossintético;
- 3) Aprimoramento do sistema de confinamento, possibilitando maiores tensões de confinamento;
- 4) Melhoria no sistema de aplicação da força cisalhante no ensaio de cisalhamento direto;
- 5) Melhoria no sistema de inclinação da plataforma para diminuir a vibração na amostra;

- 6) Melhoria na instrumentação para obter resultados mais precisos, inclusive utilizando células de carga;
- 7) Estudo de fluência de geossintético em ensaios de rampa.

6 Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-5321**: Standard test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. 1998.

AGUIAR, V. R. **Ensaio de Rampa para o Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

AGUIAR, V. R. **Ensaio de Rampa para o Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 12957-2**: Geotextiles and Geotextiles Related Products. Genebra 1999.

BECKER, L. B. **Comportamento de geogrelhas em muro de solo reforçado e em ensaios de arrancamento**. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.

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

CASTRO, D. C. **Ensaio de Arrancamento de Geogrelhas no Campo e no Laboratório**. 135p. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1999.

CIPATEX. **Especificações Técnicas da Geomembrana** Cipageo, 2003.

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

ENGEPOL. **Especificações Técnicas da Geomembrana Polimenta**, 2007

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

GIRARD, H., FISHER, S.; ALONSO, E. **Problems of Friction Posed by Use of Geomembranes on Dam Slopes-Examples and Measurements**. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 9, pp. 339-342, 1990.

GIROUD, J.P., SWAN, R.H., RICHER, P.J. e SPOONER, P.R. Geosynthetic Landfill Cap: **Laboratory and Field Tests, design and Construction**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS (EUROGEO 1), 4 1990.

GOMES, R. C. **Interação Solo-Reforço e Mecanismo de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis**. São Paulo,. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

GOURC, J. P.; LALARAKOTOSON, S.; MÜLLER-ROCHHOLTZ, H.; BRONSTEIN, Z. Friction measurement by direct shearing or tilting process – **Development of a european standard, geosynthetics: applications, design and construction**. Edition of De Groot, Den Hoedt e Termaat, Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 1039-1046.

HSIEH, C.; HSIEH, M.H.; CHEN, J. (2002) – **Direct shear behavior of sand geomembrane systems for various shear boxes** – Geosynthetics – 7th ICG – Delmas, Gourc & Girard – Nice – França.

HUESKER. **Especificações Técnicas da Geogrelha** Fortrac, 2002.

HUESKER. Especificações Técnicas da Geogrelha Fortrac, 2003.

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

INGOLD, T.S. **A Laboratory Simulation of Reinforced Clay Walls**. Geotechnique, v.31, pp. 399-412. 1981.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12957-2** Geotextiles and Geotextiles Related Products: Determination of Friction Characteristics (1 e 2). Genebra, 1999.

IZGIN, M. **Geomembrane-sand interface friction**. Dissertação de Mestrado. Middle East Technical Universal, Ankara, Turkey, 1997

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

KOERNER, R. **Desining with Geosynthetics**. Prentice Hall, 1986.

KOERNER, R. M., Emerging and Future Developments of Selected Geosynthetic Applications, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, pp.293-306. 2000.

LALARAKOTOSON, S; VILLARD, P.; GOURC, J.P. Shear Strength Characterization of Geosynthetic Interfaces on Inclined Planes. **Geotechnical Testing Journal**, 1999, Vol 22, N4, pp.284-291.

LIMA JÚNIOR, N.R. **Estudo da Aderência entre Solos e Geossintéticos em Ensaios de Rampa de Grandes Dimensões.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

LOPES, C.P.F.C. **Estudo da Interação Solo-Geossintético Através de Ensaios de Corte em Plano Inclinado.** 186p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000.

MELLO, L.G.R. **Estudo da Interação Solo-Geossintético em Taludes de Obras de Disposição de Resíduos.** 130p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, 2001.

MELO, L.G.R., LIMA Jr., N.R., PALMEIRA, E.M. (2003) Estudo da Interação entre Interfaces de Solo e Geossintético em Taludes de Áreas de Disposição de Resíduos. **Solos e Rochas**, V.26 (1), pp.19-35

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

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

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

PALMEIRA, E.M. LIMA JR, N.R. & MELLO, L.G.R. (2002). **Interaction between soils and geosynthetics layers in large scale ramp test.** **Geosynthetics International** 9 (2), IFAI, USA, 149-187..

REZENDE, E. S. **Estudo da Resistência de Interfaces Solo-Geossintético Utilizando o Equipamento de Rampa.** Dissertação de

Mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

SAEZ, J.A. **Caracterizacion geomecanica geotextiles**. In Curso sobre tecnicas generales de refuerzo del terreno y sus complicaciones. CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PÚBLICAS, Madri, 1997, vol.1, pp. 1-29.

SAYÃO, A. S. F. J., Geossintéticos – Aplicação em Estabilidade de Taludes, IX ISL, Rio de Janeiro, 2004.

SIEIRA, A.C.C.F., Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha, 360p. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2003.

TUPA, N.; PALMEIRA, E.M. **Estudo de Aderência entre Geossintéticos e Solos Finos e entre Diferentes Tipos de Geossintéticos. Solos e Rochas, 1995**, v.18(1), p.31-41.

VERTEMATTI, J.C. Manual Brasileiro de Geossintéticos, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2004, 413p.

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

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)