UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Débora Fonseca Alves

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ATRITO DA INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA

Porto Alegre
julho 2012

DÉBORA FONSECA ALVES

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ATRITO DA INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani

Porto Alegre

julho 2012

DÉBORA FONSECA ALVES

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ATRITO DA INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de julho de 2012

Prof. Luiz Antônio Bressani
PhD pela University of London
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica (UFRGS)
PhD pela University of Surrey, Grã Bretanha

Carolina Fofonka Palomino
Eng[a] pela Universidade Luterana do Brasil

Marcelo Heidemann (UFRGS)
Msc pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, ao meu irmão e ao Bruno, que sempre me apoiaram e ajudaram a atingir todos os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Antônio Bressani, orientador deste trabalho, pela dedicação, pelo incentivo e pelas contribuições fundamentais para a elaboração dessa pesquisa.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pelo empenho e colaboração, dedicando grande parte do seu tempo para a realização desse e de vários outros trabalhos de conclusão de curso.

Agradeço ao corpo docente da Escola de Engenharia da UFRGS, que me proporcionaram uma ótima formação acadêmica.

Agradeço ao Jair Francisco Floriano da Silva pelos ensinamentos e colaborações laboratoriais necessárias para a realização dessa pesquisa e aos demais colegas e amigos do Laboratório de Geotecnologia, Marcelo Heidemann, Marco Antônio Conte, Renata Lima Moretto e Rodrigo Carreira Weber.

Agradeço a todos os meus amigos que me ajudaram a crescer profissionalmente e pessoalmente ao longo dos anos dedicados à Engenharia.

Agradeço ao Bruno Éttoro Bueno, pela compreensão nos momentos em que estive distante e pelos diversos auxílios para a conclusão desse trabalho.

Agradeço aos meus tios Samuel Salvador da Fonseca, Sérgio Salvador da Fonseca, Marta Salvador da Fonseca e Paulo Salvador da Fonseca por me auxiliarem na parte metalúrgica necessária para a realização dos ensaios de laboratório.

Agradeço aos meus tios, tias, primos e avós por sempre me apoiarem e auxiliarem nas minhas escolhas.

Agradeço ao meu irmão, Lindomar Júnior Fonseca Alves por sempre me compreender e estar ao meu lado.

Agradeço especialmente aos meus pais, Lindomar e Marlene Alves, que me deram as condições necessárias para concluir o curso de Engenharia, e também muito amor, carinho e dedicação em toda a minha vida.

Quanto menos inteligente um homem é,
menos misteriosa lhe parece a existência.

Arthur Schopenhauer

RESUMO

O uso de geossintéticos têm crescido muito nos últimos anos, podendo esses serem aplicados em diversos tipos de obras de Engenharia. As geomembranas, por exemplo, são geocompostos utilizados principalmente para impermeabilizações em, por exemplo, aterros sanitários, canais de irrigação e barragens. Com o intuito de analisar a resistência da interface entre areias e geomembranas, visando contribuir para a melhor utilização desses materiais, nesse trabalho foram realizados ensaios de cisalhamento direto com caixas de dimensão 100x100 mm. As areias utilizadas foram as de construção civil, com granulometria média e as areias de Osório/RS, uma vez que são materiais bem conhecidos e caracterizados geotecnicamente. Dois tipos de geomembranas foram utilizados, uma lisa e outra texturizada, e os ensaios ocorreram para dois índices de vazios diferentes para cada uma das duas areias, totalizando a realização de oito envoltórias de resistência de diferentes combinações de interfaces. Com os valores obtidos comprovou-se que os ângulos de atrito de interface estudados dependem de uma série de fatores, sendo muito variável com a rugosidade superficial do geossintético. Para as geomembranas texturizadas os valores do ângulo de atrito de interface com areias são mais elevados que para as lisas e dependem mais do solo em contato e da sua compactação. Além disso, nas geomembranas lisas a resistência de interface de pico é mobilizada em pequenos deslocamentos com quedas elevadas após o pico. Quanto às eficiências a variação nos resultados também foi mais significativa em geomembranas texturizadas, apresentado valores menores para as lisas.

Palavras-chave: Geomembrana. Interface. Ensaio de Cisalhamento Direto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento do trabalho 19

Figura 2 – Desenho esquemático do equipamento para ensaio de plano inclinado 32

Figura 3 – Comparação entre os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento 33

Figura 4 – Configurações do ensaio *Ring Shear* para estudo da interface de geomembranas com solos 34

Figura 5 – Esquema do equipamento de cisalhamento direto 36

Figura 6 – Gráficos com parâmetros de resistência de interface de ensaios de cisalhamento direto 38

Figura 7 – Cinco tipos básicos de ensaio de cisalhamento direto 39

Figura 8 – Geomembranas lisa (direita) e texturizada (esquerda) 42

Figura 9 – Selos das geomembranas estudadas 43

Figura 10 – Curva granulométrica da areia de Osório 44

Figura 11 – Equipamento de cisalhamento direto utilizado nos ensaios 45

Figura 12 – Foto e projeto das peças de adaptação utilizadas no ensaio 46

Figura 13 – Cortes esquemáticos do ensaio com geomembrana 46

Figura 14 – Colagem da geomembrana com o bloco de madeira 47

Figura 15 – Esquema da segunda etapa do programa experimental 48

Figura 16 – Imagem da tela do equipamento 49

Figura 17 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado fofo..... 51

Figura 18 – Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia de Osório seca no estado fofo 51

Figura 19 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado denso 52

Figura 20 – Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia de Osório seca no estado denso 52

Figura 21 – Curva granulométrica da areia média de construção civil 53

Figura 22 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado fofo 54

Figura 23 – Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia média de construção seca no estado fofo 54

Figura 24 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado denso 55

Figura 25 – Envoltória de resistência ao cisalhamento da areia média de construção seca no estado denso 55

Figura 26 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana lisa 56

Figura 27 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana lisa 57

Figura 28 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana lisa 57

Figura 29 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana lisa 58

Figura 30 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana lisa 58

Figura 31 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana lisa 59

Figura 32 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana lisa 59

Figura 33 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana lisa 60

Figura 34 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana texturizada 61

Figura 35 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana texturizada 61

Figura 36 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana texturizada 62

Figura 37 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana texturizada 62

Figura 38 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana texturizada 63

Figura 39 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana texturizada 63

Figura 40 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana texturizada 64

Figura 41 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana texturizada 64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo das principais geomembranas fabricadas 25
Quadro 2 – Alguns dos ensaios usuais em geomembranas 29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de geomembranas mais utilizadas e suas formulações aproximadas ... 23
Tabela 2 – Exemplos de propriedades das geomembranas PEAD texturizadas 26
Tabela 3 – Exemplos de propriedades das geomembranas PEAD lisas 27
Tabela 4 – Exemplos de propriedades das geomembranas de PVC 27
Tabela 5 – Variações dos ângulos de atrito de interface para geomembranas e solos granulares 40
Tabela 6 – Variações dos ângulos de atrito de interface para geomembranas e solos granulares 41
Tabela 7 – Índices de vazios aproximados utilizados nos ensaios 48
Tabela 8 – Ângulos de atrito interno das areias estudadas 65
Tabela 9 – Ângulos de atrito de interface estudados 65
Tabela 10 – Eficiência ou coeficiente de atrito de cada ensaio realizado 66

LISTA DE SIGLAS

CSPE – Polietileno Clorosulfonado

GMR – Geomembranas reforçadas

GMT – Geomembranas texturizadas

GRI – *Geosynthetics Research Institute*

PE – Polietileno

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEC – Polietileno clorado

PELMD – Polietileno de média densidade

PGI – PVC *Geomembrane Institute*

PVC – Policloreto de Vanila

PVC-P – PVC com plasticidade

LISTA DE SÍMBOLOS

τ – resistência ao cisalhamento (kN/m^2)

c – coesão (kPa)

σ – tensão normal no plano de ruptura (kN/m^2)

ϕ – ângulo de atrito interno (graus)

N – força normal (kN)

A – área (m^2)

F – força resistente ao cisalhamento (kN)

τ_f – resistência ao cisalhamento de interface (kN/m^2)

c_a – adesão do solo com a geomembrana (kPa)

δ – ângulo atrito de interface (graus)

E_c – coeficiente de aderência (%)

E_ϕ – coeficiente de atrito (%)

e – índice de vazios (adimensional)

γ_s – peso específico do solo (kN/m^3)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA 17
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO 17
2.2.1 Objetivo Principal 17
2.2.2 Objetivos Secundários 17
2.3 PRESSUPOSTO 18
2.4 PREMISSA 18
2.5 DELIMITAÇÕES 18
2.6 LIMITAÇÕES 18
2.7 DELINEAMENTO 18
3 GEOMEMBRANAS 21
3.1 DEFINIÇÕES 21
3.2 CLASSIFICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS 22
3.3 DEFINIÇÕES DAS GEOMEMBRANAS 24
3.4 ENSAIO COM GEOMEMBRANAS 27
4 RESISTÊNCIA DE INTERFACES 31
4.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE 31
4.1.1 Ensaio de Plano Inclinado 32
4.1.2 Ensaio de Arrancamento 33
4.1.3 *Ring Shear* 34
4.1.4 Ensaio de Cisalhamento Direto 35
4.2 DADOS DE ÂNGULO DE ATRITO DE INTERFACE APRESENTADOS NA LITERATURA 40
5 MATERIAIS E MÉTODOS 42
5.1 MATERIAIS 42
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS 43
5.3 ADAPTAÇÕES DO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO 44
5.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL 47
6 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS 50
6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO 50
6.1.1 Areia de Osório 50
6.1.2 Areia Média da Construção Civil 52

6.2 RESISTÊNCIA DE INTERFACE GEOMEMBRANA E SOLOS ARENOSOS 55
6.2.1 Geomembrana Lisa 56
6.2.2 Geomembrana Texturizada 60
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS 65
7 CONCLUSÕES 68
REFERÊNCIAS 71

1 INTRODUÇÃO

O uso de geossintéticos em obras de Engenharia tem crescido muito nas últimas décadas em todos os países, apresentando-se como soluções aplicáveis, muitas vezes práticas e economicamente viáveis. As geomembranas especificamente têm aplicações, por exemplo, na construção de aterros sanitários, canais de irrigação, barragens e várias outras obras que necessitam de impermeabilização. Com o intuito de aprimorar o uso desses materiais existem muitas pesquisas no Brasil e no exterior que abordam o tema.

Uma das linhas de estudo com geomembranas e outros geocompostos é a de resistência de interface com vários outros materiais de construção civil. A importância dessa análise visa a estabilidade dos elementos que compõem a estrutura, formada muitas vezes por solos e geossintéticos. Para isso, geralmente, são determinados em laboratório os ângulos de atrito das interfaces dos materiais.

Diversos estudos são apresentados na literatura, utilizando diferentes equipamentos e métodos de pesquisa para investigar os mecanismos que atuam no comportamento de cisalhamento das interfaces. Um dos ensaios mais utilizados, e que foi empregado nesse trabalho, é o de cisalhamento direto. Os equipamentos, apesar de normatizados por especificações internacionais, muitas vezes apresentam adaptações em relação aos utilizados para esses ensaios com amostras constituídas somente com solos. Assim são obtidos dados mais precisos e confiáveis sobre a interface estudada.

Nesse trabalho foram realizados estudos com uso de duas geomembranas e dois tipos de areia padrão, sendo areia de construção de granulometria média e areia proveniente de Osório/RS. As caixas de cisalhamento utilizadas foram de 100x100 mm em um aparelho padrão com pequenas modificações no equipamento. Com os resultados foram então realizadas comparações e análises sobre as resistências da interface das geomembranas utilizadas com solos arenosos padrões.

O estudo baseou-se na comparação dos resultados de ângulo de interface de oito interfaces diferentes, analisando-se as resistências de interface das combinações de geomembranas lisas e texturizadas com areia de Osório e areia média da construção civil, sendo cada solo ensaiado com dois índices de vazios diferentes, um mais fofo e outro mais denso. Contudo,

como não foram analisados os índices de vazios máximos e mínimos de cada solo em laboratório não se pode afirmar sobre a compacidade desses materiais. Para a finalidade de análise e comparações de resultados nesse trabalho apenas utilizou-se a terminologia de fofo e denso para os diferentes índices de vazios ensaiados.

O trabalho primeiramente apresenta uma breve descrição sobre as geomembranas. São apresentadas algumas definições sobre esses materiais, classificações, características e definições. Descreve-se também resumidamente a experiência internacional acerca de ensaios de caracterização com geocompostos.

No capítulo 4 é abordada a resistência de interface entre geomembranas e outros geossintéticos com outros materiais. Aborda-se os principais ensaios utilizados para esse tipo de estudo, como os ensaios de plano inclinado, de arrancamento, *Ring Shear* e de cisalhamento direto. Também são apresentados alguns resultados da literatura referentes a ensaios realizados com areias e geomembranas.

As caracterizações dos materiais utilizados, a metodologia utilizada para a realização dos ensaios desse trabalho e os detalhes de execução são apresentados no capítulo 5. As etapas do programa experimental, mostrando a organização utilizada para a realização dos ensaios, também são identificadas nesse capítulo.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos nesse estudo. Primeiramente são mostrados os resultados dos ensaios de caracterização das areias utilizadas no estudo. Posteriormente são mostrados os resultados das interfaces areias-geomembranas, seguidas de uma breve análise dos valores obtidos.

O último capítulo desse trabalho apresenta as conclusões obtidas com base nos ensaios realizados comparando os resultados das diferentes interfaces estudadas. A análise final, as discussões e as sugestões para futuros estudos são também abordadas nesse item.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o método de pesquisa utilizado para a elaboração do trabalho, destacando a questão de pesquisa e os objetivos.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão da pesquisa é: frente a resultados obtidos mediante ensaios de cisalhamento direto, quais são os valores do ângulo de atrito de interface entre os solos arenosos e as geomembranas testadas?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é a verificação do ângulo de atrito de interfaces areia-geomembrana com base em ensaios de cisalhamento direto.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

a) análise dos aparelhos do ensaio de cisalhamento direto e apresentação de adaptações realizadas que permitam obtenção de resultados de resistência de interface entre solos e geomembranas;

b) descrição dos ensaios de cisalhamento direto para análise com solos e geomembranas.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os ensaios de cisalhamento direto são aplicáveis para o estudo sobre o ângulo de atrito de interface entre solos arenosos e geomembranas.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que estudos aprofundados sobre a resistência de interface entre solos e geomembranas possibilitam a aplicação dessas para impermeabilização, visando maior desempenho e vida útil das obras.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à verificação do ângulo de atrito da interface areia-geomembrana somente com base em ensaios de cisalhamento direto.

2.6 LIMITAÇÕES

O trabalho tem como limitação o estudo de dois tipos de areias padrão, areia de Osório e areia média comercial, com dois tipos de geomembranas.

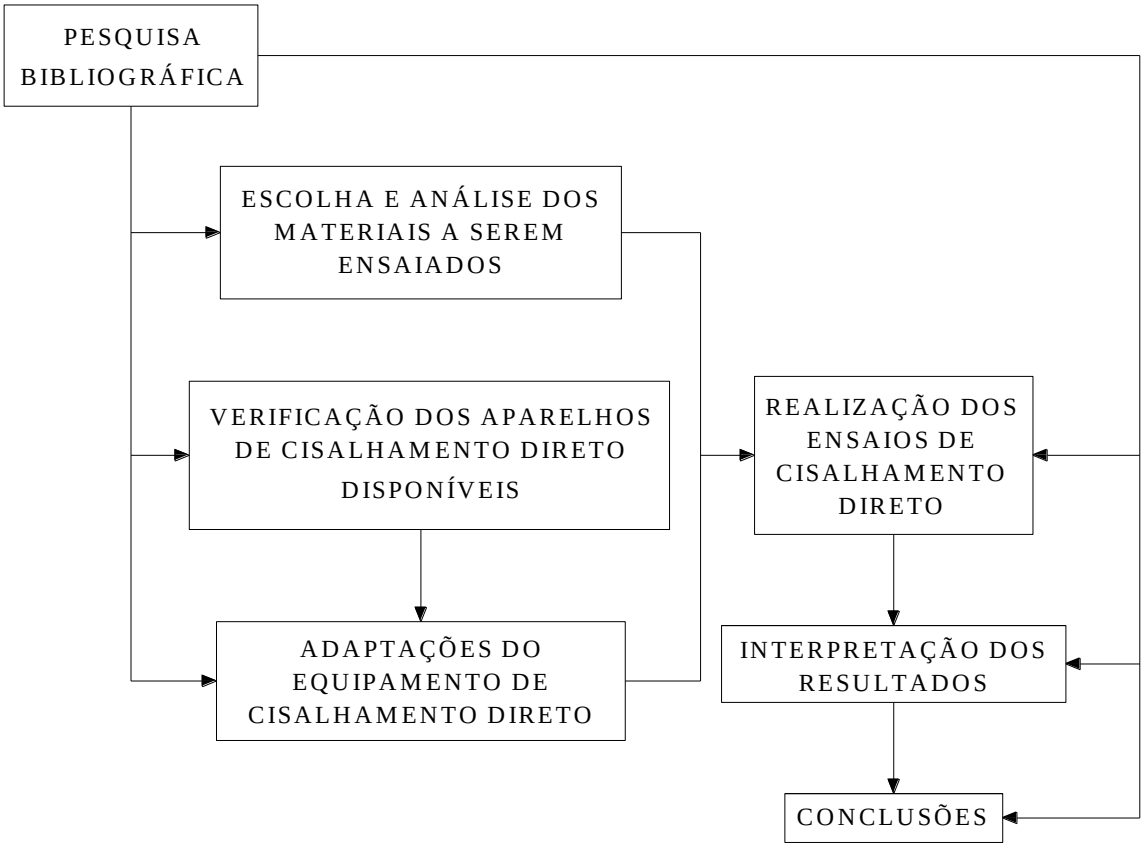
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão apresentadas na figura 1, que serão descritas posteriormente:

a) pesquisa bibliográfica;
b) verificação dos aparelhos de cisalhamento direto disponíveis;
c) separação e identificação dos materiais a serem estudados;
c) adaptações do equipamento de cisalhamento direto;
d) realização dos ensaios de cisalhamento direto;
e) interpretação dos resultados;

f) conclusões.

Figura 1 – Delineamento do trabalho



(fonte: elaborada pela autora)

Na pesquisa bibliográfica foram coletadas as informações necessárias para criar um embasamento teórico acerca do tema proposto. São nela analisados itens como a caracterização das geomembranas, as suas principais características, os ensaios utilizados para determinar a resistência de interface solo-geomembrana e alguns dos resultados apresentados por diversos pesquisadores. Com o referencial obtido, o trabalho seguiu por duas frentes principais. Na primeira foram escolhidos e analisados os materiais a serem aplicados, sendo, por exemplo, realizados alguns ensaios de caracterização necessários para as areias. Na segunda frente de pesquisa, que ocorreu simultaneamente à anterior, foram analisados os aparelhos de cisalhamento direto disponíveis para a realização dos ensaios. Posteriormente, com o equipamento pré-definido, foram estudadas algumas adaptações para o ensaio de cisalhamento direto para serem obtidos melhores resultados.

Com o equipamento de cisalhamento direto adaptado para a realização dos ensaios com geomembranas e com os materiais selecionados, foram iniciados os experimentos. Obtidos os resultados necessários, esses foram analisados, interpretados e comparados com os existentes na literatura. Com os dados reunidos pôde-se, assim, realizar a elaboração do relatório com as conclusões obtidas sobre a resistência de interface para as geomembranas e areias estudadas.

3 GEOMEMBRANAS

O uso de geossintéticos, com especial ênfase para geomembranas e geotêxteis, vem se intensificando nas últimas décadas. No Brasil, o uso desses materiais data do início da década de 1970, sendo desde então utilizados em várias aplicações geotécnicas e ambientais. Estima-se que no ano de 2005, por exemplo, cerca de 60 milhões de metros quadrados de materiais que compõem a família dos geossintéticos tenham sido consumidos no País (BUENO et al., 2007, p. 1).

Devido à necessidade de mais pesquisas com geossintéticos, visando contribuir para o conhecimento e aplicação desse produto em obras de Engenharia Civil, e sendo as geomembranas o material a ser analisado no estudo, nesse capítulo são sintetizadas algumas informações da bibliografia. Serão abordados os fundamentos teóricos sobre geomembranas, como definições, classificações e ensaios de desempenho.

3.1 DEFINIÇÕES

A Norma ASTM D4439 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2011a, p. 2, tradução nossa), que apresenta as terminologias padrões de geossintéticos, caracteriza-os como produtos planares sintéticos produzidos com materiais poliméricos. O texto proporciona também a definição de geomembranas, que são geocompostos formados por uma ou mais camadas essencialmente impermeáveis.

Pela classificação definida por norma brasileira, a NBR 12553 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 1-2) as geomembranas podem ser definidas como produtos bidimensionais de baixíssima permeabilidade. Sua composição engloba predominantemente asfaltos, elastômeros ou plastômeros, As geomembranas reforçadas (GMR) são denominadas dessa forma quando há uma armadura de reforço incorporada ao produto, formando uma estrutura monolítica. As geomembranas texturizadas (GMT) possuem acabamento superficial rugoso com função de aumentar as características de atrito de interface.

Colmanetti (2006, p. 31) coloca que as geomembranas podem ser reforçadas de diversas formas, como pela inserção, quando na fábrica, de uma tela de material tecido ou não-tecido. Elas ainda podem ser solidarizadas a um geotêxtil, na forma de camadas contínuas, denominadas de geocompostos. As vantagens que a GMR apresenta são, dentre outras:

a) maior estabilidade no processo de fabricação;
b) maior estabilidade quanto a expansões e contrações apresentadas pelas geomembranas quando submetidas a variações de temperatura;
c) aumento da resistência à tração, ao rasgo, ao estouro e à punção.

Conforme Koerner (1991, p. 4-5, tradução nossa), as geomembranas são definidas como uma camada polimérica ou betuminosa manufaturada de espessuras do tipo simples ou múltiplas. A fabricação, devido às características dos materiais, pode ser por diversas técnicas, resultando em produtos com espessuras que variam de 0,5 a 5,0 mm.

Um dos tipos mais utilizados de geomembranas são as de polietileno (PE), O processo de fabricação dessas geomembranas é realizado pelo método de extrusão, que por sua vez pode apresentar duas variações, uma de matriz plana e outra circular ou balão. Segundo Colmanetti (2006, p. 30):

> No processo de matriz plana a solução composta por resina e aditivos é forçada a passar por duas calandras paralelas, resultando em painéis de espessura variando entre 0,75 e 3,00 mm. O processo de matriz circular constitui de duas matrizes concêntricas, orientadas verticalmente, onde a solução atravessa resultando em uma espécie de tubo de grande diâmetro, gerado pelo sopro de ar no interior do mesmo que resfria e direciona a lâmina até rolos na parte superior do sistema, que a conduzem ao corte e ao desdobramento.

Outro tipo de geomembrana é a de PVC, que é manufaturada pelo método de calandragem, que consiste na mistura dos constituintes em uma câmara, sendo aquecidos para dar início à reação. Eles são transportados por uma série de rolos até formarem lâminas com espessuras variando entre 0,5 e 3,0 mm e com larguras de até 2,4 m (COLMANETTI, 2006, p. 30).

3.2 CLASSIFICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS

Segundo Froebel (1997, p. D-72, tradução nossa), existem muitos tipos de geomembranas poliméricas, sendo aproximadamente 90% delas compreendidas por quatro sistemas básicos. As formulações mais comumente utilizadas são: PEAD (polietileno de alta densidade),

PELMD (polietileno linear de média densidade), PVC (policloreto de vinila) e CSPE (polietileno clorosulfonado). As variações realizadas a partir das quatro geomembranas básicas são realizadas por modificações nas configurações, tais como espessuras, texturas, reforços e composições. Na tabela 1 estão apresentadas as formulações aproximadas das geomembranas básicas.

Tabela 1 – Tipos de geomembranas mais utilizadas e suas formulações aproximadas

Tipo de Geomembrana	Resina (%)	Plastificante (%)	Enchimento (%)	Negro de fumo ou pigmentos (%)	Aditivos (%)
PEAD	95 - 98	0	0	2 - 3	0,25 - 1
PELMD	94 - 96	0	0	2 - 3	1 - 4
PVC	45 - 60	25 - 35	0 - 10	2 - 5	2 - 5
CSPE	40 - 60	0	30 - 45	5 - 40	5 - 15

(fonte: FROEBEL, 1997, p. D-72, tradução nossa)

O emprego dos geossintéticos compreende uma seleção, dentre os diversos materiais existentes no mercado, dos produtos que atendam aos aspectos fundamentais do comportamento da obra. Segundo Bueno (2003, p. 163-164), três posturas de Engenharia têm sido utilizadas para selecionar o material a ser empregado:

> a) as que se baseiam na experiência do projetista com obras semelhantes;
>
> b) as que se respaldam em especificações técnicas disponíveis na literatura;
>
> c) as que são estabelecidas com base nas funções que se espera que o material vá desempenhar na obra.

No caso específico do Brasil, as experiências com uso de geossintéticos ainda são muito recentes. Assim, as formas de seleção, seja por obras semelhantes ou baseadas em especificações, originam-se de análises de experiências de outros países que nem sempre são adequadas às necessidades do projeto (BUENO, 2003, p. 164).

Segundo Colmanetti (2006, p. 29), uma das variações existentes das geomembranas é a de PVC com plastificante (PVC-P), sendo:

> [...] uma mistura líquida de resina, plastificante, estabilizante e carga, que é um tipo de aditivo incorporado à fórmula para melhorar o desempenho da geomembrana. As lâminas de PVC-P estão em uma faixa de espessura entre 1,0 e 3,0 mm. [...] As

> geomembranas de PVC podem diferir quanto a quantidade e tipos de plastificantes e estabilizantes usados em sua fabricação, o que resulta em produtos com diferentes desempenhos.

Sobre a permeabilidade das geomembranas, elas são denominadas barreiras impermeáveis em muitas classificações. Porém, segundo Geroto (2008, p. 49):

> [...] através de ensaios de permeabilidade de vapor d'água em laboratórios, verificou-se que esses materiais apresentam valores típicos de permeabilidade compreendidos entre 1.10^{-10} a 1.10^{-13} cm/s. Pode-se afirmar que as geomembranas são capazes de prover uma barreira para líquidos e vapores, já que a permeabilidade apresentada pelo material é extremamente baixa.

3.3 DESEMPENHO DAS GEOMEMBRANAS

A análise das características e desempenho das geomembranas é necessária para a seleção do produto a ser utilizado em determinada obra. A avaliação das vantagens e desvantagens de cada tipo de geomembrana pode ser observada no quadro 1, sendo apresentado o comparativo entre algumas das principais geomembranas fabricadas.

No Brasil, as geomembranas mais utilizadas em obras são as de PEAD e de PVC. As geomembranas de PEAD têm as principais aplicações em barreiras de desvio e controle de fluxo em sistemas de revestimento de fundo dos aterros sanitários e no sistema de cobertura de células de resíduo (GEROTO, 2008, p. 49-50).

Segundo Sharma e Lewis (1994, p. 75, tradução nossa), as geomembranas de PVC também são utilizadas em obras de contenção de resíduos, apesar de serem indicadas para uso em obras de caráter provisório devido a aspectos de durabilidade e resistência a ataques químicos. Nos Estados Unidos, por exemplo, são indicadas para usos em obras de aproximadamente 1 a 5 anos de vida útil. Porém, com o avanço da tecnologia de fabricação, essas geomembranas têm apresentado grandes melhorias, visando a aplicação em obras de longo prazo.

Quadro 1 – Comparativo das principais geomembranas fabricadas

Geomembrana	Vantagens	Desvantagens
PVC (policloreto de vinila)	Boa trabalhabilidade;	Baixa resistência aos raios UV, ozônio, sulfídeos e elementos de intempéries.
	Altas caracteristicas de resistência;	
	Facilidade para execução de emenda.	Fraco desempenho em altas e baixas temperaturas.
PELMD e PEAD (Polietileno de média e alta densidade)	Boa resistência a diversos agentes químicos;	Suscetivel ao fenômeno de "stress cracking".
	Boas caracteristicas de resistência e soldas;	Baixa resistência ao puncionamento.
	Bom desempenho a baixas temperaturas.	
PEC (polietileno clorado)	Boa resistência aos raios UV e agentes de intempéries;	Baixa resistência para químicos, ácidos e óleos.
	Bom desempenho a baixas temperaturas;	Baixa qualidade na emenda.
	Boas caracteristicas de resistência.	
CSPE (polietileno clorosulfonado)	Boa resistência aos raios UV e agentes de intempéries;	Baixas caracteristicas de resistência.
	Boa resistência para químicos, ácidos e óleos;	
	Boa resistência para bactérias;	Problemas com emendas.
	Bom desempenho para baixas temperaturas.	

(fonte: BAGCHI, 1994[1] apud GEROTO, 2008, p. 50)

Colmanetti (2006, p. 29) afirma que as geomembranas de PEAD possuem contração quase insignificante pelo fato de não conterem componentes voláteis, porém a expansão térmica é considerável, podendo formar rugas de alguns centímetros. Esses materiais possuem elevada resistência mecânica e química, tornando-os aplicáveis em obras como aterros sanitários, resíduos industriais e taludes de ensecadeiras. Possuem alta durabilidade, muitas vezes superando o tempo de vida da estrutura. Em locais com grandes e rápidas mudanças climáticas, porém, a aplicação pode se tornar difícil para a realização das emendas em campo.

Geomembranas de PE podem apresentar problemas de fissuramento sob tensão, chamados de *stress cracking*, que estão diretamente relacionados com o grau de cristalinidade do material e da morfologia de suas regiões cristalinas. Lodi (2003, p. 18-19) indica que:

> A cristalinidade consiste em um arranjo regular perfeito e repetitivo dos átomos individuais nas três direções cristalográficas. No caso dos polímeros, a cristalinidade, quando ocorre, nunca é total e consiste no alinhamento de segmentos

[1] BAGCHI, A. **Design, construction and monitoring of landfills**. 2. ed. New York: John Wiley & Son, 1994.

> de cadeias em um arranjo tridimensionalmente perfeito. Nesses casos, os polímeros são denominados semicristalinos. Os domínios cristalinos dos polímeros (cristalitos) contêm mais imperfeições que os cristais dos sólidos convencionais além de estarem interconectados com as regiões cristalinas e amorfas sem uma clara divisão dessas regiões. A facilidade de cristalização dependerá da estrutura química, peso molecular e condições de cristalização do polímero.

Sobre as características das geomembranas de PEAD, devidas à sua cristalinidade, Geroto (2008, p. 52) salienta que:

> Geomembranas com alta cristalidade, como o PEAD com cristalidade da ordem de 90%, apresentam maiores rigidez, resistência mecânica, densidade, estabilidade dimensional, resistência à tração, resistência à abrasão, temperatura de fusão cristalina, temperatura de transição vítrea, etc. No entanto, a cristalidade causa a diminuição de outras propriedades como a resistência ao impacto, alongamento na ruptura, claridade ótica e resistência ao fenômeno de fissuramento sob tensão, também denominado *stress cracking*.

As geomembranas de PE possuem especificações próprias ditadas pelo *Geosynthetics Research Instutute* (GRI). Na tabela 2 são apresentadas algumas das propriedades especificadas pela norma GRI GM-13 para geomembranas de PEAD texturizadas e na tabela 3 para geomembranas PEAD lisas. Com as tabelas 2 e 3, pode-se observar que, além da influência direta na superfície das geomembranas, as texturas modificam também algumas das propriedades desses materiais. Notam-se diferenças significativas na resistência à tração e à deformação axial nas rupturas, sendo essas maiores para as geomembranas lisas. Além disso, o puncionamento também apresenta diminuição para as geomembranas texturizadas.

Tabela 2 – Exemplos de propriedades das geomembranas PEAD texturizadas

Propriedades	Espessuras (mm)						
	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3
Resistência à tração (kN/m)							
no escoamento	11	15	18	22	29	37	44
na ruptura	8	10	13	16	21	26	32
Deformação axial (%)							
no escoamento	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
na ruptura	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Resistência ao rasgo (N)	93	125	156	187	249	311	374
Puncionamento (N)	200	267	333	400	534	667	800
Tensufissuramento (h)	300 h	300 h	300 h	300 h	300 h	300 h	300 h

(fonte: GEOSYNTHETIC INSTITUTE, 2011, p. 10, tradução nossa)

Tabela 3 – Exemplos de propriedades das geomembranas PEAD lisas

Propriedades	Espessuras (mm)						
	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3
Resistência à tração (kN/m)							
no escoamento	11	15	18	22	29	37	44
na ruptura	20	27	33	40	53	67	80
Deformação axial (%)							
no escoamento	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%
na ruptura	700%	700%	700%	700%	700%	700%	700%
Resistência ao rasgo (N)	93	125	156	187	249	311	374
Puncionamento (N)	240	320	400	480	640	800	960
Tensufissuramento (h)	300 h	300 h	300 h	300 h	300 h	300 h	300 h

(fonte: GEOSYNTHETIC INSTITUTE, 2011, p. 8, tradução nossa)

As propriedades das geomembranas de PVC são apresentadas pelo PVC *Geomembrane Institute* (PGI-1104 de 2003), que também são apresentadas na norma ASTM D7176-6 de 2011. Na tabela 4 são apresentadas as prescrições consideradas de referência em diversos países, inclusive no Brasil.

Tabela 4 – Algumas propriedades das geomembranas de PVC

Propriedades	Espessuras (mm)					
	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
Resistência à tração (kN/m)						
na ruptura	4,2	8,4	12,8	17	20,3	24
Deformação axial (%)						
na ruptura	250%	360%	380%	430%	430%	450%
Módulo em 100% de deformação (kN/m)	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8
Resistência ao rasgo (N)	11	27	35	44	58	67
Cisalhamento de soldas (kN/m)	-	6,7	10	14	17	20
Adesão de soldas (kN/m)	-	2,2	2,6	2,6	2,6	2,6

(fonte: adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D7176-6, 2011b, p. 2, tradução nossa; PVC GEOMEMBRANE INSTITUTE, 2003, tradução nossa)

3.4 ENSAIOS COM GEOMEMBRANAS

A caracterização das geomembranas pode ser realizada por diversos tipos de ensaios. Para a realização desses ensaios com geossintéticos, muitas normas e especificações têm sido utilizadas. Dessas normas, destacam-se as normas internacionais ISO (*International*

Organization for Standardization), as americanas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e as eurorpéias (*European Committee for Standardisation*). No Brasil tem sido comum optar, quando não existem normas nacionais, pelas normas americanas e pelas normas internacionais (LODI, 2003, p. 35). O quadro 2 apresenta alguns dos ensaios mais comuns realizados nas geomembranas e suas respectivas referências.

Conforme Rigo e Cazzuffi (1991, p. 22, tradução nossa), a caracterização das geomembranas requer dois passos, o primeiro de ensaios de identificação e o segundo de ensaios de performance e desempenho, sendo esse último realizado nas juntas das geomembranas com estudos de durabilidade. Enquanto o tipo de geomembrana tem uma influência particular na escolha dos procedimentos de ensaios de identificação, os ensaios de desempenho são mais influenciados pela aplicação particular da mesma.

Bueno (2003, p. 173-174) enfatiza a importância dos ensaios de identificação, pois além dos ensaios de desempenho, há também a preocupação com o controle da qualidade e os tipos de produtos que compõem a formulação da geomembrana. Em vista disso, com muita frequência, devem ser incorporados ensaios de identificação dos componentes químicos, como análises termogravimétricas, termomecânicas e calorimetria diferencial de varredura.

Os ensaios de desempenho devem demonstrar a capacidade da geomembrana exercer sua função em campo, levando-se em conta as tensões *in situ* e as condições ambientais. Esses ensaios podem ser realizados no corpo principal da geomembrana ou nas emendas de construção. Os objetivos dos ensaios de *performance* são controlar a capacidade da geomembrana ou do sistema como um todo, incluindo a geomembrana, de resistir às tensões ao longo do tempo. Assim, além das informações técnicas sobre as características dos produtos, é necessário que se faça também, um programa de ensaios para receber os produtos em campo (LODI, 2003, p. 35).

Bueno (2003, p. 176) estabelece que os ensaios de propriedades físicas e mecânicas são relativamente simples de serem executados e importantes para identificação do produto, auxiliar na classificação da amostra e para estabelecer uma expectativa de comportamento do produto. Já os ensaios hidráulicos, por lidarem com grandezas muito pequenas, acabam sendo mais difíceis de serem realizados no contexto da Engenharia Geotécnica.

Quadro 2 – Alguns dos ensaios usuais em geomembranas

ENSAIO	NORMA
Ensaios de Identificação	
Espessura	ASTM D1593, D5199 e D3767
Densidade	ASTM D792, D1505 e D297
Massa por Unidade de Área	ASTM D3776
Ensaio de Tração	ASTM D638, D882 e D751
Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	ASTM D3417 e D3418
Análise Termogravimétrica (TGA)	ASTM D6370 e E2105
Análise Termomecânica (TMA)	ASTM D648 e E831
Índice de Fusão (MFI)	ASTM D1238
Teor de Solventes	ASTM D297
Dureza	ASTM D2240
Extraíveis	ASTM D297 e D3421
Teor de cinzas	ASTM D297
Tempo de Oxidação (OIT)	ASTM D3895
Teor de Negro de Fumo (PE)	ASTM D1603
Dispersão de Negro de Fumo (PE)	ASTM D5596 e D3015
Ensaios de Desempenho	
Resistência ao Rasgo	ASTM D1004, D2263 e D624
Resistência ao Estouro	ASTM D5617
Resistência ao Puncionamento	ASTM D4833 e FTMS 101C
Cisalhamento	ASTM D5321
Fluência	ASTM D5262
Expansão Térmica	ASTM D696
Estabilidade Dimensional	ASTM D1204
Permeabilidade (água)	ASTM E96
Permeabilidade (vapor)	ASTM E96
Ensaios de Desempenho em Emendas	
Ensaio de Cisalhamento	
Ensaio de Descolamento	
Ponto de Escoamento Mecânico	
Pressurização das Emendas	
Aplicação de Ar	ASTM D4437 e D4545
Caixa de Vácuo	ASTM 6392, GM19 e GM14
Plano de Impedância Ultra-Sônico	
Ressonância Ultra-Sônica	
Ensaios de Durabilidade	
Abrasão	ASTM D460 e D2228
Exposição à Intempérie	ASTM D1435
Envelhecimento Térmico	ASTM D573
Exposição ao Calor (Estufa)	ASTM D794 e D5721
Exposição à Radiação UV	ASTM G153, G154 e G155
Resistência Química EPA 9090, D5747 e D5322	EPA 9090, D5747 e D5322
Resistência Biológica	ASTM G22 e G21
Envelhecimento por Ozônio	ASTM D1149
Fissuramento sob Tensão (PE)	ASTM D1693 e D5397

(fonte: LODI, 2003, p. 38)

Bueno (2003, p. 176) ainda ressalta que os ensaios de desempenho, como de compatibilidade química, de resistência à degradação térmica, à radiação UV e de fissuração sob tensão (*stress cracking*) têm tido ênfase no estudo das geomembranas. Isso tem ocorrido devido a esses ensaios ajudarem o projetista a deliberar sobre o desempenho do material para prazos consideráveis da vida útil da obra.

4 RESISTÊNCIA DE INTERFACE

O estudo da resistência de interface entre geomembranas e outros materiais é importante para a análise da viabilidade das aplicações desses materiais em diversos casos, como contenções de resíduos ou de efluentes. As geomembranas são geralmente utilizadas como barreiras impermeáveis e aplicadas muitas vezes sobre diversos tipos de solos. Assim, a necessidade do estudo da resistência de interface entre esses materiais ocorre porque em alguns casos as interfaces formadas podem se constituir em planos preferenciais de ruptura, condicionando a estabilidade do resíduo, de coberturas e da barreira como um todo (VERTEMATTI, 2004, p. 353).

Na literatura existem muitas informações acerca da resistência de interface entre geomembranas e diversos materiais seguindo diferentes técnicas. Porém, segundo Vertematti (2004, p. 353), muitas das informações presentes na literatura são aplicáveis às características utilizadas, limitando-se, por exemplo, ao material empregado e às condições a partir das quais foram obtidas. Assim, foi realizada uma pesquisa acerca do tema, sendo essa resumida neste capítulo com alguns dos métodos, características de ensaios de resistência da interface com geomembranas e dados de resistência presentes na literatura.

4.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE

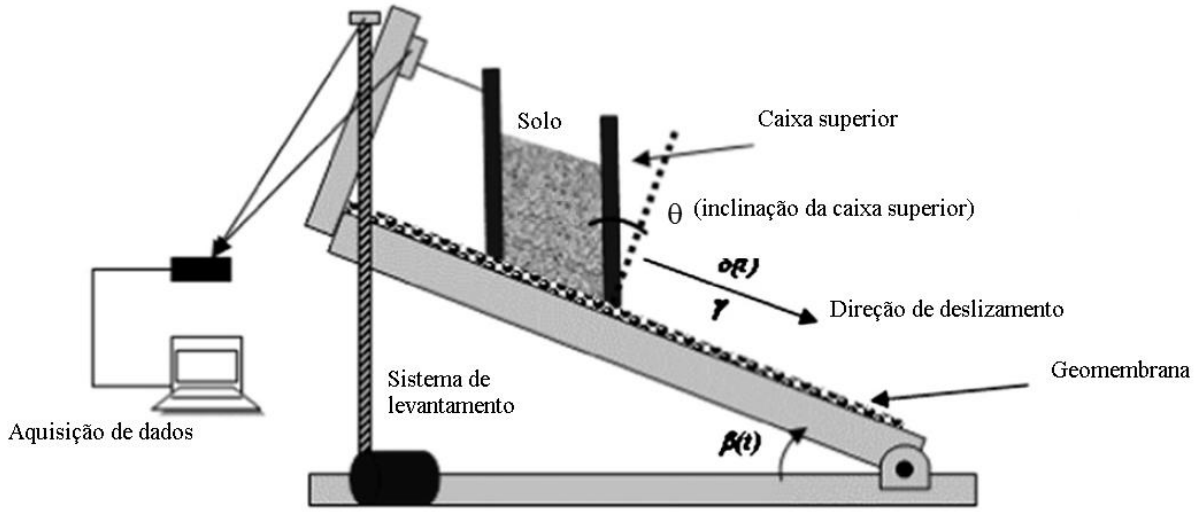
Diversos dispositivos têm sido utilizados para estudar e quantificar a resistência de interface. Segundo Ingold (1991, p. 144-145, tradução nossa), os métodos do teste para determinar a resistência da interface geomembrana-solo são similares àqueles empregados para investigar as propriedades de geotêxteis.

Os ensaios mais comuns na bibliografia têm sido o de plano inclinado, de arrancamento, *Ring Shear* e de cisalhamento direto. Nos próximos itens serão abordados os testes principais de análise de resistência de interface, tendo um enfoque principal no ensaio de cisalhamento direto, por ser a base do presente estudo.

4.1.1 Ensaio de plano inclinado

O equipamento de plano inclinado possui diversas configurações presentes na literatura, mas a ideia principal do ensaio consiste em utilizar uma mesa articulada em uma das extremidades que pode ser elevada com velocidade constante, normalmente de três graus por minuto, em relação a outra extremidade até que ocorram escorregamentos em torno da interface (figura 2). A realização do ensaio consiste em uma massa de solo confinada em uma caixa rígida que é apoiada sobre o geossintético, por sua vez fixado a um plano, inicialmente posicionado na horizontal. No decorrer do teste a inclinação do plano é aumentada até ocorrer o deslizamento ao longo da interface de solo e geomembrana (IZGIN; WASTI, 1998, p. 208, tradução nossa; PITANGA et al., 2009, p. 436, tradução nossa; REBELO, 2003, p. 35).

Figura 2 – Desenho esquemático do equipamento para ensaio de plano inclinado



(fonte:adaptado de PITANGA et al., 2009, p. 436, tradução nossa)

Os ensaios de plano inclinado são conduzidos a baixas tensões normais, com valores variando de 5 a 50 kPa. A limitação é necessária porque tensões maiores podem induzir a um significante momento e consequente tombamento do bloco. Acredita-se que para baixas tensões normais pode não ser exato o resultado de cisalhamento devido à dificuldades mecânicas (REBELO, 2003, p. 35). Porém, Izgin e Wasti (1998, p. 208, tradução nossa) afirmam que essa não pode ser considerada uma desvantagem, uma vez que o ensaio reproduz as condições reais mais precisamente nos sistemas onde as tensões normais são geralmente baixas.

Apesar das variações nos equipamentos de realização do ensaio, buscando aprimorar o teste, algumas desvantagens ainda são citadas na bibliografia. Rebelo (2003, p. 36) enfatiza, por exemplo, que algumas das desvantagens do ensaio de plano inclinado são: a variação da tensão normal sobre a rampa com a inclinação da mesma e a forma de distribuição da tensão normal, a qual é admitida uniforme ao longo da interface, o que não corresponde à realidade.

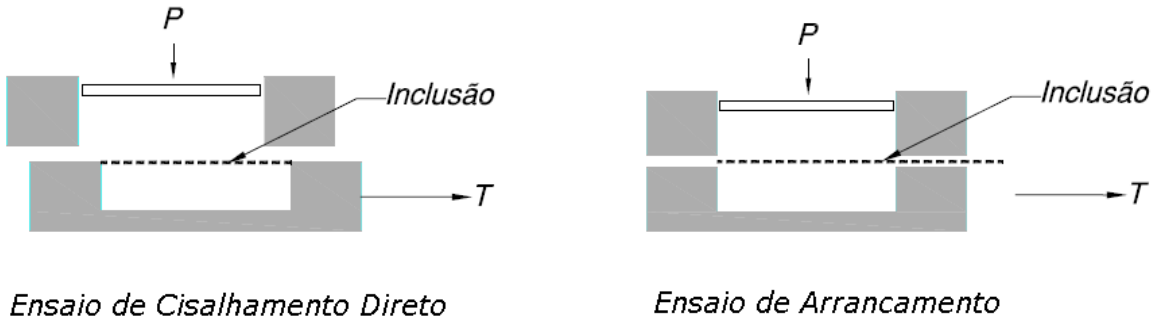
4.1.2 Ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento é realizado em equipamentos de cisalhamento direto modificados com a inclusão de uma garra que tem como finalidade prender o geossintético, impedindo-o de se movimentar. Esse movimento origina forças de cisalhamento nas duas faces da geomembrana em contato com o solo (AGUIAR, 2003, p. 20). Assim, segundo Rebelo (2003, p. 33), esse ensaio simula com maior fidelidade o comportamento de geossintéticos submetidos a esforços de tração.

O Manual Técnico de Reforço de Solos da empresa Maccaferri (SAYÃO et al., 2009, p. 136) afirma que:

> Os ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto diferem entre si basicamente pela forma com que os esforços são aplicados ao geossintético, pelos mecanismos de ruptura impostos e pelas condições de contorno de cada um [figura 3]. Os diferentes procedimentos de ensaios trazem divergências experimentais. A padronização seria necessária para garantir a repetição dos resultados.

Figura 3 – Comparação entre os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento



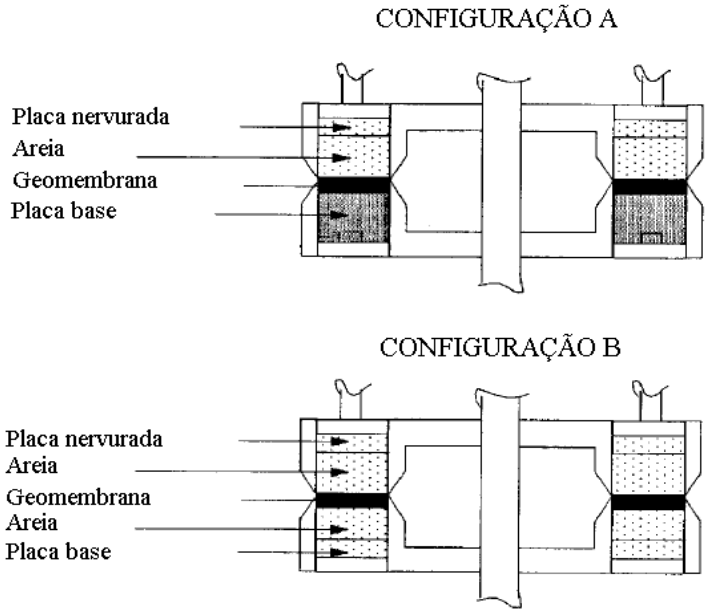
(fonte: TEIXEIRA, 2003, p. 12)

Teixeira (2003, p. 11) ainda indica que os ensaios de arrancamento são muito utilizados em casos de estudos de solos com geogrelhas. Isso ocorre devido às diferenças nos mecanismos de interação do elemento de reforço com o solo. Já para casos de contato entre solo e geotêxtil os ensaios de cisalhamento direto se mostram mais adequados.

4.1.3 *Ring Shear*

O ensaio *Ring Shear* consiste em uma amostra anelar de solo confinada radialmente entre anéis concêntricos e verticalmente por uma pedra porosa e um anel superior, o qual transmite carregamento para a amostra. Anéis dinamométricos ficam presos ao anel superior, com a finalidade de medir o torque transmitido à amostra quando o anel inferior é rotacionado. Durante o ensaio são medidos deslocamento angular, força e deslocamento vertical (WINGLER; VILAR, 2005, p. 42). Na figura 4 são esquematizadas duas configurações do ensaio utilizadas para o estudo de interface solo e geomembrana no trabalho de Vaid e Rinne (1995, p. 314).

Figura 4 – Configurações do ensaio *Ring Shear* para estudo da interface de geomembranas com solos



(fonte: adaptado de VAID; RINNE, 1995, p. 314, tradução nossa)

Segundo Stark e Poeppel (1994, p. 599, tradução nossa), a principal vantagem do ensaio é que os deslocamentos por cisalhamento podem ser continuados em uma direção até atingir a condição de resistência residual. Também apresenta o benefício de manter seção constante de ensaio durante o cisalhamento.

4.1.4 Ensaio de Cisalhamento Direto

Segundo Pinto (2006, p. 265) e Das (2007, p. 301-304), o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento e a mais simples forma de arranjo para determinação da resistência ao cisalhamento. Baseia-se diretamente no critério de Mohr-Coulomb, que aproxima a resistência ao cisalhamento pela função linear da tensão normal expressa na fórmula 1. A ruptura deverá ocorrer quando a tensão de cisalhamento em um plano atingir o valor dado pela fórmula 1:

$$\tau = c + \sigma.\mathrm{tg}\phi \qquad \text{(fórmula 1)}$$

Onde:

τ = resistência ao cisalhamento;

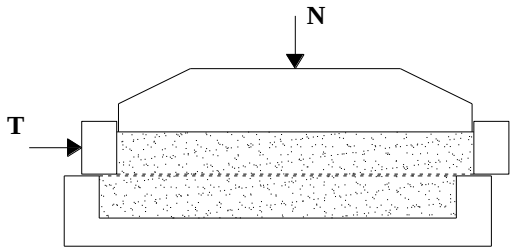
c = coesão;

σ = tensão normal no plano de ruptura;

ϕ = ângulo de atrito interno.

O equipamento do ensaio clássico consiste em uma caixa de cisalhamento de metal na qual o corpo de prova é inserido (figura 5). A caixa é dividida em duas partes, e a força normal (N) é aplicada a partir da metade superior. A força de cisalhamento é aplicada em uma das partes, com a finalidade de mover uma metade da caixa em relação à outra, impondo que a ruptura ocorra no plano horizontal. Assim, para a realização do ensaio aplica-se uma tensão normal num plano e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura na amostra (PINTO, 2006, p. 265; DAS, 2007, p. 304).

Figura 5 – Esquema do equipamento de cisalhamento direto



(fonte: adaptado de PINTO, 2006, p. 265)

Segundo Das (2007, p. 305), a tensão normal e a de cisalhamento para qualquer deslocamento cisalhante dependem da área da seção transversal da amostra. As fórmulas 2 e 3 representam a relação dessas grandezas:

$$\sigma = N/A \qquad \text{(fórmula 2)}$$

$$\tau = F/A \qquad \text{(fórmula 3)}$$

Onde:
N = força normal
A = área
F = força resistente ao cisalhamento

Para estudos da interface de solos com geomembranas, considera-se a fórmula 4, que avalia a superfície de contato da geomembrana com o solo (KOERNER, 2005, p. 453, tradução nossa). A dedução dessa fórmula segue, assim, a mesma ideia da utilizada para estudos apenas com solos no ensaio padrão, colocada na fórmula 1:

$$\tau_f = c_a + \sigma.tg\delta \qquad \text{(fórmula 4)}$$

Onde:

τ_f = resistência ao cisalhamento de interface solo-geomembrana;

c_a = adesão do solo com a geomembrana;

σ = tensão normal no plano de ruptura;

δ = ângulo de atrito de interface solo-geomembrana.

Assim como para outros geossintéticos, pode ser calculada a eficiência de maneira padrão, obtendo valores em porcentagem. Para isso considera-se os parâmetros obtidos da resistência de interface de solo-geomembrana, comparativamente com os parâmetros da resistência ao cisalhamento da mesma areia, como pode ser observado nas fórmulas 5 e 6:

$$E_c = (c_a / c).100 \qquad \text{(fórmula 5)}$$

$$E_\phi = (\tan \delta / \tan \phi).100 \qquad \text{(fórmula 6)}$$

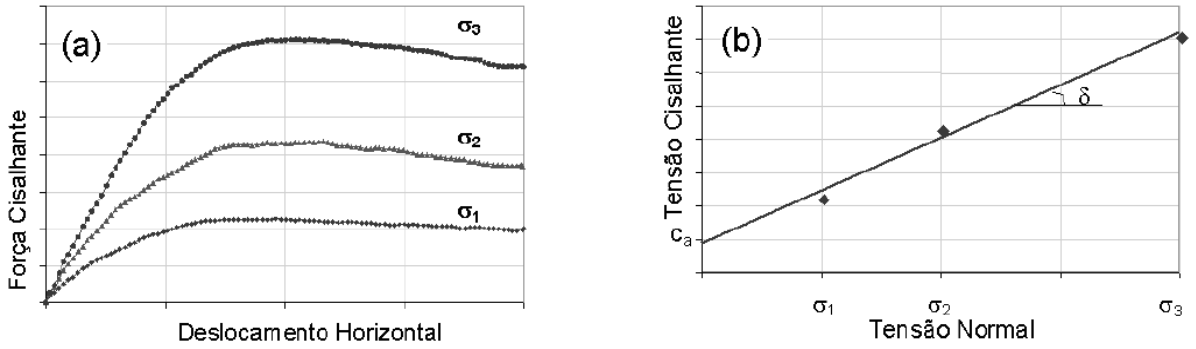
Onde:

E_c = coeficiente de aderência;

E_ϕ = coeficiente de atrito.

O ensaio deve ser repetido para diferentes tensões normais, conforme retratado na figura 6a. Com os valores dos ensaios é possível definir uma curva de tensão cisalhante versus tensão normal, como a esquematizada na figura 6b, podendo-se determinar graficamente parâmetros de resistência de interface como adesão (c_a) e ângulo de atrito (δ) solo-geomembrana (SAYÃO et al., 2009, p. 139).

Figura 6 – Gráficos com parâmetros de resistência de interface
de ensaios de cisalhamento direto



(fonte: SAYÃO et al., 2009, p. 139)

Com base no ensaio clássico de cisalhamento direto, os pesquisadores apresentam diversas adaptações no aparelho para a realização do estudo da interface solo-geomembrana. Nos Estados Unidos o ensaio com geotêxteis é normalizado pela ASTM D5321-08 e na União Européia segue-se a norma ISO 12957-1:2005.

A norma ASTM D5321-08 indica algumas especificações que são muitas vezes seguidas por pesquisadores, como o uso de caixas de cisalhamento de no mínimo 300x300 mm para avaliações de interface (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2008, p. 2, tradução nossa), que são maiores que as utilizadas em ensaios de cisalhamento direto para estudos com solos apenas. Porém, Koerner (2005, p. 451, tradução nossa) salienta que em análises de geomembranas com areias, argilas ou siltes, podem ser utilizadas dimensões de 100x100 mm. Apenas para avaliações de cascalho ou outros materiais de grande tamanho de partículas com geomembranas são necessárias caixas maiores.

O teste de cisalhamento direto é dominante nas publicações que abordam o estudo do atrito entre geomembranas e solos. Para o estudo de resistência de interface o ensaio deve ser executado com amostras com dois materiais, sendo que para isso o plano de cisalhamento deve ser aquele que os separa e do qual se deseja conhecer o valor do ângulo de atrito de interface (COLMANETTI, 2006, p. 133).

Na literatura são encontrados diversos métodos que podem ser usados no ensaio, como por exemplo, caixas com diferentes dimensões e modificações no equipamento que facilitem leituras das medidas de forças e deslocamento. Ingold (1991, p. 145-146, tradução nossa) cita que existem cinco tipos básicos de teste (figura 7), ou seja, caixas de cisalhamento:

a) fixa: o geotêxtil ou geomembrana é colocado sobre um bloco rígido, o qual é inserido na parte inferior da caixa. A metade superior é preenchida com solo, que é cisalhado sobre a geomembrana ou geotêxtil;

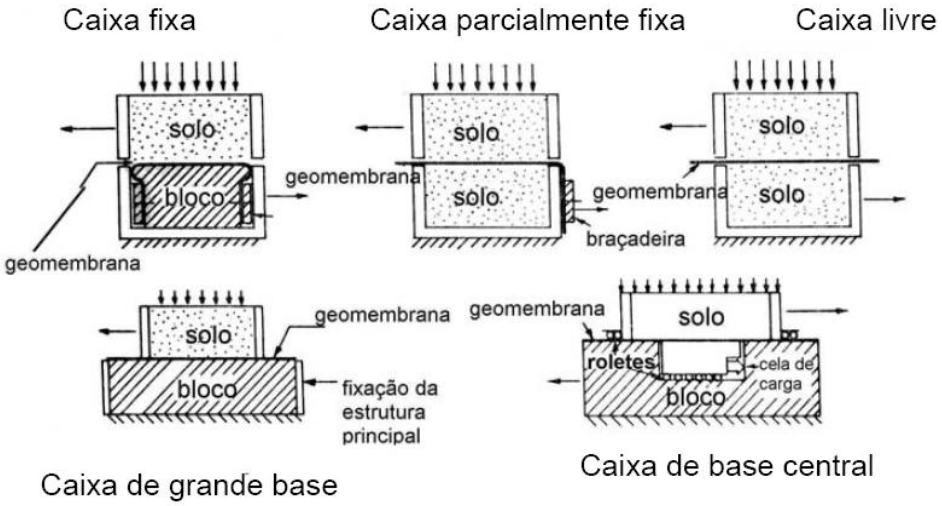
b) parcialmente fixa: a geomembrana ou outro geotêxtil é estendido sobre o solo que preenche a parte inferior da caixa. Uma das extremidades do material sintético é fixada na caixa e o solo contido na metade superior é cisalhado sobre a interface;

c) livre: o ensaio é similar ao realizado com caixa de cisalhamento parcialmente fixa, porém o geotêxtil fica livre em ambos os lados;

d) de grande base: o ensaio é similar ao realizado com caixa de cisalhamento fixa, entretanto a metade inferior da caixa tem uma dimensão plana mais larga que a metade superior contendo solo. Este ensaio apresenta como principal vantagem o contato constante da área entre o solo e o material sintético;

e) de base central: o princípio é similar ao da caixa de cisalhamento de base larga, contudo a força de atrito gerada na geomembrana ou outro geotêxtil qualquer é medida sobre uma área plana menor que a área plana do solo na parte superior da caixa de cisalhamento.

Figura 7 – Cinco tipos básicos de ensaio de cisalhamento direto



(fonte: adaptado de INGLOD, 1990, p. 146, tradução nossa)

Segundo Stark e Poeppel (1994, p. 599, tradução nossa), no ensaio de cisalhamento direto as amostras são submetidas a pequenos deslocamentos. Assim, como a resistência de pico é mobilizada para pequenos deslocamentos, este ensaio promove uma boa análise da resistência de pico. Contudo o uso do cisalhamento direto apresenta restrições quando empregado para estudos da resistência residual na interface.

O Manual de Reforço de Solos da empresa Maccaferri (SAYÃO et al., 2009, p. 139) salienta que:

> [...] para casos contendo solo na metade inferior da caixa] durante a fase de adensamento o solo pode sofrer deformações, alterando a posição da geogrelha para o início do cisalhamento. Nesse caso, o cisalhamento pode ocorrer na interface solo-solo, daí a dificuldade em se obter parâmetros que realmente apresentem a interface [...]

4.2 DADOS DE ÂNGULO DE ATRITO DE INTERFACE APRESENTADOS NA LITERATURA

Segundo Vaid e Rinne (1995, p. 310, tradução nossa), os trabalhos apresentados na literatura comumente utilizam dois tipos de geomembranas, as de PEAD e as de PVC, em contato com areias padronizadas ou conhecidas no mercado. Assim, a literatura apresenta diversos valores que podem ser utilizados como base para outros estudos, mas evidenciando-se a necessidade de ensaios específicos que retratem, o mais fielmente possível, as condições de solicitações da obra, com vistas à definição dos parâmetros de projeto (VERTEMATTI, 2004, p. 355).

Na tabela 5 são apresentadas algumas faixas de variação de ângulos de atrito de interface entre solos e geomembranas reportadas por Sharma e Lewis (1994, p. 147, tradução nossa). Na tabela 6 são indicados os ângulos de pico para três tipos de areias registrados por Koerner (2005, p. 454, tradução nossa). Comparando os dados, pode-se observar que os valores obtidos na tabela 6 estão dentro das faixas indicadas na tabela 5, tendo apenas alguma variação para a interface da geomembrana PEAD rugosa com a areia de Ottawa e as de micaxisto.

Tabela 5 – Variações dos ângulos de atrito de interface para geomembranas e solos granulares

Ângulos de Atrito de Interface de Geomembranas e Areias		
Geomembrana	PVC	20° - 30°
	PEAD Lisa	17° - 25°
	PEAD Rugosa	30° - 40°

(fonte: adaptado de SHARMA; LEWIS, 1994, p. 147, tradução nossa)

Tabela 6 – Variações dos ângulos de atrito de interface para geomembranas e solos granulares

Geomembrana	Areia de construção	Areia de Ottawa	Areia de micaxisto
PEAD			
Rugosa	30°	26°	22°
Lisa	18°	18°	17°
PVC			
Rugosa	27°	-	25°
Lisa	25°	-	21°

(fonte: adaptado de KOERNER, 2005, p. 127, tradução nossa)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

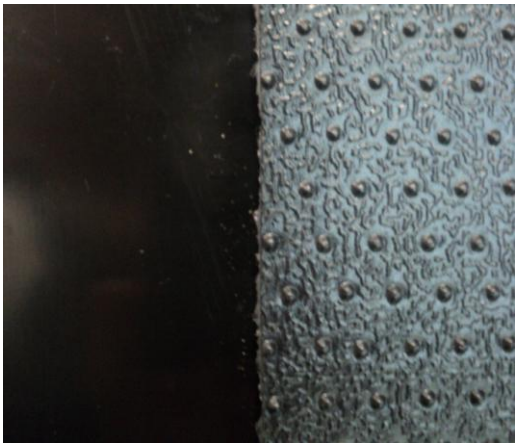
Com o propósito de estudar a resistência de interface de dois tipos de geomembranas com dois solos arenosos distintos, foram realizados ensaios de cisalhamento direto. Nesse capitulo, primeiramente, serão especificadas algumas das características dos materiais estudados. Além disso, serão apresentados o equipamento utilizado, com a descrição das adaptações realizadas para o estudo da interface de solos com geomembranas, e o método utilizado na realização dos ensaios.

5.1 MATERIAIS

No trabalho foram utilizados dois solos arenosos bem característicos, a areia média de construção civil e a areia proveniente de Osório. Foram escolhidos para o estudo esses dois materiais comumente utilizados na Engenharia Geotécnica com o intuito de obter resultados generalistas sobre as resistências de interfaces com as geomembranas analisadas.

As duas geomembranas estudadas são de PEAD com texturas diferentes, sendo uma delas texturizada e a outra lisa (figura 8). A espessura de ambos os materiais é de 1,50 mm, como pode ser observado nos selos reproduzidos na figura 9.

Figura 8 – Geomembranas lisa (direita) e texturizada (esquerda)



(fonte: foto da autora)

Figura 9 – Selos das geomembranas estudadas

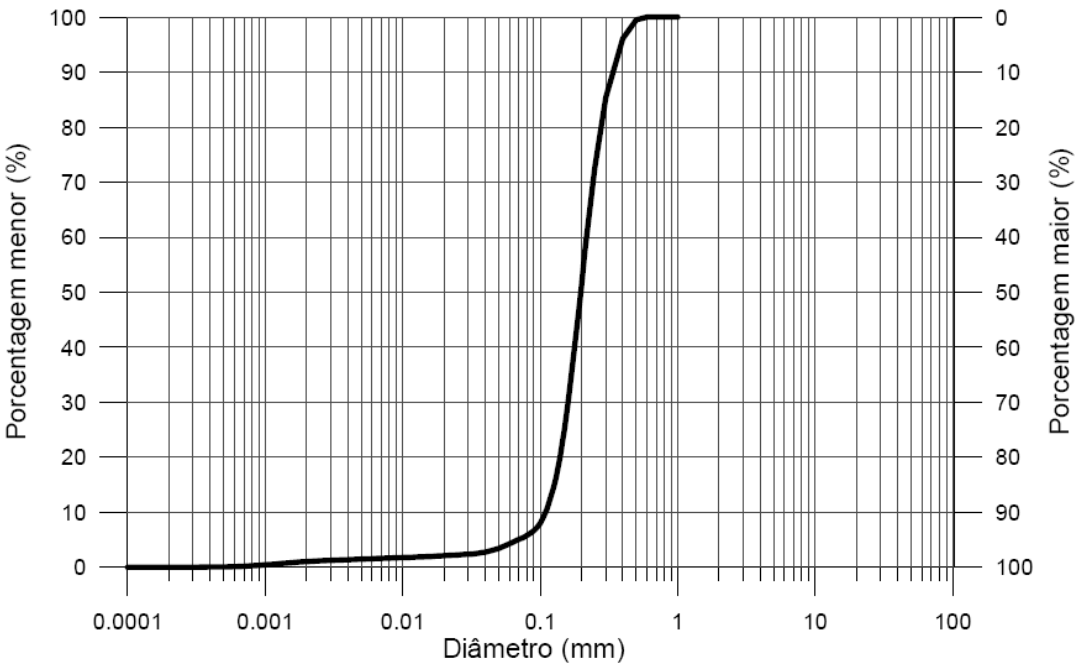
(fonte: foto da autora)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A caracterização física dos solos arenosos foi baseada na análise granulométrica e no peso específico real dos grãos. Para a areia de Osório, como essa é muito bem caracterizada na literatura, foram utilizados os dados colocados por Festugato (2008, p. 69-70). A areia média da construção civil, por poder apresentar variações entre amostras de diferentes fontes, foi ensaiada seguindo as referências dadas pela NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984b) para a análise granulométrica e segundo a NBR 6508 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984a) para o peso específico real dos grãos.

Festugato (2008, p. 69) obteve a curva granulométrica da areia de Osório realizada por peneiramento e completada por *laser*, com o resultado apresentado na figura 10, classificando-a como uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. Na caracterização física do solo a massa específica real dos grãos é considerada de 26,2 kN/m^3.

Figura 10 – Curva granulométrica da areia de Osório



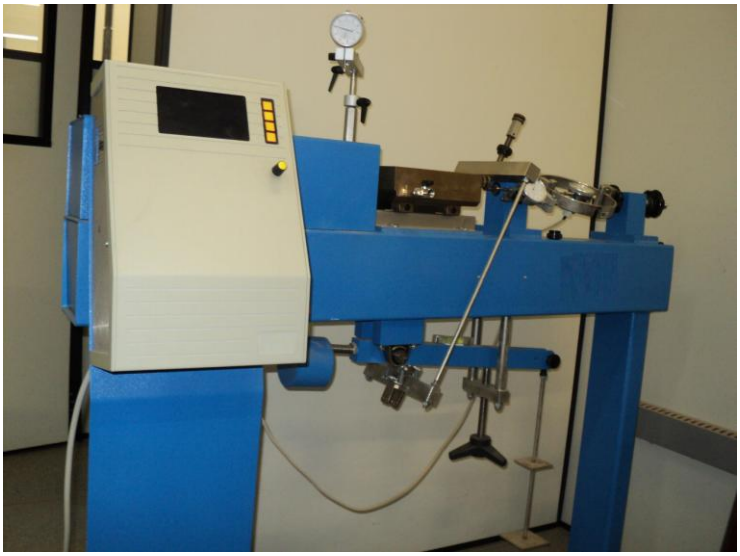
(fonte: FESTUGATO, 2008, p. 69)

Para a caracterização mecânica de ambos os solos arenosos, foram determinados os ângulos de atrito interno pelo ensaio de cisalhamento direto, uma vez que o mesmo foi empregado no estudo com geomembranas. Foram ensaiadas as duas areias para um maior e menor grau de compactação, buscando aproximar aos valores dos índices de vazios (e) utilizados nos estudos com as geomembranas. A caixa de cisalhamento empregada possui dimensões de 100 x 100 mm e foram realizados ensaios para as tensões normais de 50, 100 e 150 kPa no mesmo equipamento utilizado para os ensaios com geomembranas, disponível no Laboratório de Geotecnologia.

5.3 ADAPTAÇÕES NO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO

A determinação da resistência de interfaces envolvendo as amostras e geomembranas foi realizada com o equipamento disponível no Laboratório de Geotecnologia que possui a caixa de cisalhamento com dimensão 100 x 100 mm (figura 11). A escolha do equipamento foi realizada com base na citação de Koerner (2005, p. 451, tradução nossa), segundo a qual, conforme colocado anteriormente, a dimensão de 100 x 100 mm é aconselhada para estudos com areias. Porém foram necessárias algumas adaptações na caixa do equipamento de cisalhamento direto disponível para poderem ser realizados estudos com geomembrana.

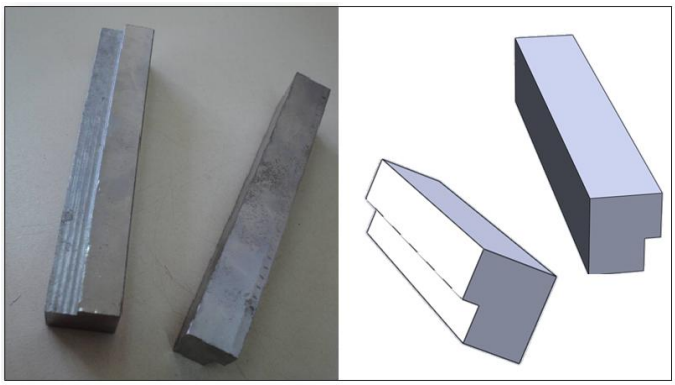
Figura 11 – Equipamento de cisalhamento direto utilizado nos ensaios



(fonte: foto da autora)

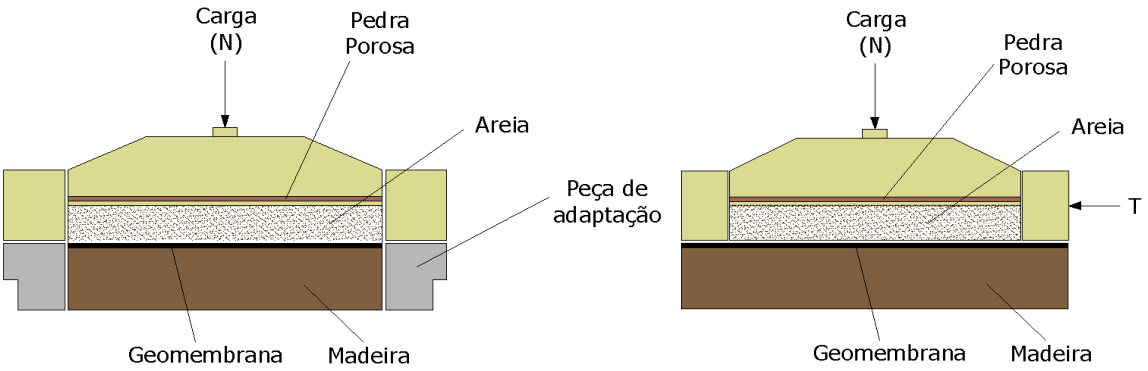
Dentre os modelos de ensaios apresentados buscou-se seguir o modelo de caixa de grande base indicados por Ingold (1991, p. 145-146, tradução nossa), por apresentar a vantagem do contato constante da área entre o solo e o geossintético. Como base para a geomembrana a ser ensaiada, foram utilizados blocos de madeira com dimensões de aproximadamente de 12,80 x 10 cm de largura e comprimento e 2,30 cm de altura. Como o bloco de madeira substituiu a parte inferior original da caixa de cisalhamento foi necessário projetar duas novas peças metálicas para suportarem o cisalhamento da parte superior da caixa. Essas peças serviram como superfície de suporte lateral para o deslizamento da parte superior da caixa original durante o ensaio. Na figura 12 são apresentadas imagens do projeto e uma fotografia das peças usinadas. Dois cortes verticais esquemáticos, transversais entre si, com as duas novas peças de adaptação são apresentados na figura 13.

Figura 12 – Foto e projeto das peças de adaptação utilizadas no ensaio



(fonte: foto e ilustração da autora)

Figura 13 – Cortes esquemáticos do ensaio com geomembrana



(fonte: ilustração da autora)

O geossintético ensaiado foi fixado ao bloco de madeira para que não ocorressem deslocamentos relativos entre esses materiais, o que afetaria os resultados. Conforme a figura 14, foi utilizado adesivo de colagem (cola de sapateiro) para a união da geomembrana com a madeira. As recomendações do fabricante para a colagem foram respeitadas, aplicando-se nas duas faces o produto e aguardando de cinco a dez minutos para aderi-las. Adotou-se também um tempo de cura de no mínimo 24 horas após a junção das superfícies para garantir a colagem.

Figura 14 – Colagem da geomembrana com o bloco de madeira

(fonte: foto da autora)

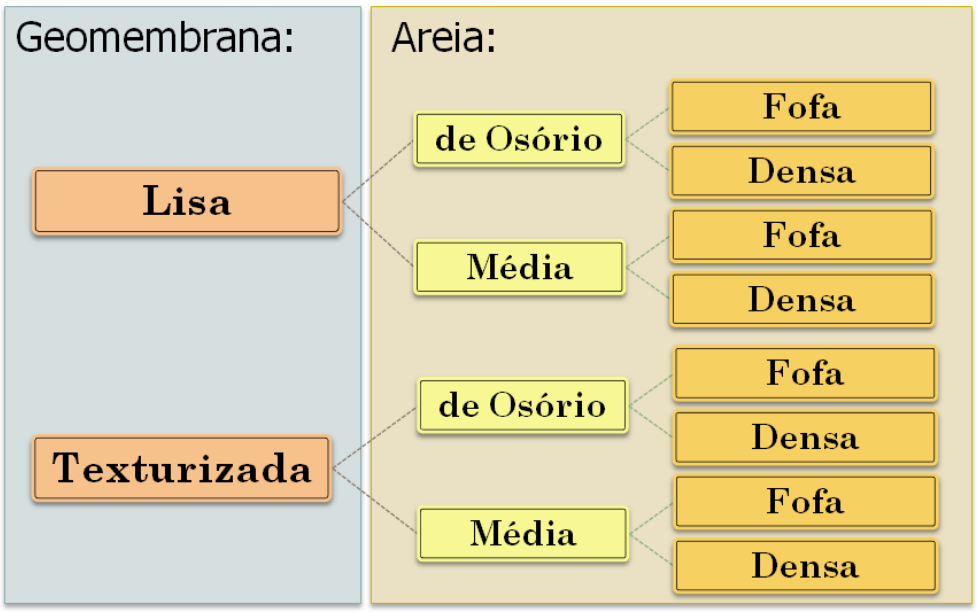
5.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental dos ensaios de cisalhamento direto foi dividido em duas etapas principais. Na primeira etapa, foram ensaiados apenas os dois solos arenosos secos, complementando a caracterização física dos materiais e obtendo os valores de ângulo de atrito interno das areias para a caracterização mecânica desses materiais através da realização de ensaios de cisalhamento, conforme descrito no item 5.2. Na segunda etapa foram realizados os ensaios para determinação dos ângulos de interfaces das geomembranas lisas e texturizadas com os dois solos arenosos moldados na condição seca em estado fofo e denso, objetivo principal do estudo. A figura 15 apresenta de forma esquemática as combinações dos ensaios realizados, estando em vermelho e verde os materiais utilizados e em azul a variação no índice de vazios.

Para cada uma das areias estudadas, de Osório e média da construção civil, foram realizados ensaios com dois índices de vazios obtidos de forma mais ou menos consistente em laboratório, por moldagem do solo seco, na condição fofa e na condição densa. A moldagem no índice de vazios desejado era realizada no momento de montagem de cada ensaio. Para o caso de corpos de prova fofos, era feito o preenchimento de volume do ensaio pela colocação da areia através de um pequeno funil com quedas a baixas alturas. No caso dos corpos de provas densos, a moldagem era feita com auxílio de vibrações laterais e pequenos golpes verticais com o bastão, para compactação do solo. O controle do índice de vazios foi realizado

pela massa total de solo utilizada para preencher a caixa de cisalhamento. Os índices de vazios obtidos para cada solo são apresentados na tabela 7.

Figura 15 – Esquema da segunda etapa do programa experimental



(fonte: elaborada pela autora)

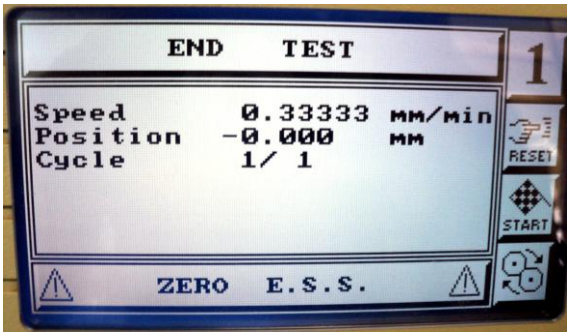
Tabela 7 – Índices de vazios aproximados utilizados nos ensaios

	Osório	Média
Fofa	0,85	0,80
Densa	0,65	0,65

(fonte: elaborada pela autora)

Na segunda fase do plano experimental foram analisadas ao total oito interfaces areia-geomembrana, conforme visto na figura 15. Cada análise foi realizada com três tensões normais (50, 100 e 150 kPa) para melhor aproximação da reta no gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal. Os ensaios foram realizados com velocidade de 0,333 mm/s e foram programados para chegaram a deslocamentos de no máximo 10 mm. Na figura 16, pode ser observada a imagem da tela do equipamento com a velocidade programada e na posição zero, ou seja, pronto para a realização de um novo ensaio.

Figura 16 – Imagem da tela do equipamento



(fonte: foto da autora)

6 RESULTADOS E ANÁLISE DOS ENSAIOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as duas etapas do programa experimental. Os dados da primeira etapa estão indicados no item de ensaios de caracterização, sendo esses a curva granulométrica, peso específico e ângulo de atrito interno pelo ensaio de cisalhamento direto para a areia média da construção civil. Os resultados dos ensaios de resistência de interface entre geomembranas e areias, indicados no item posterior, são apresentados com os gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante, deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical e envoltórias de resistência de interface (tensão normal *versus* tensão cisalhante).

6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização das areias de Osório e média da construção civil, utilizadas no estudo, estão presentes separadamente nos itens 6.1.1 e 6.1.2, respectivamente. A caracterização de cada material foi baseada em curvas granulométricas, peso específico real dos grãos e ensaios de cisalhamento direto.

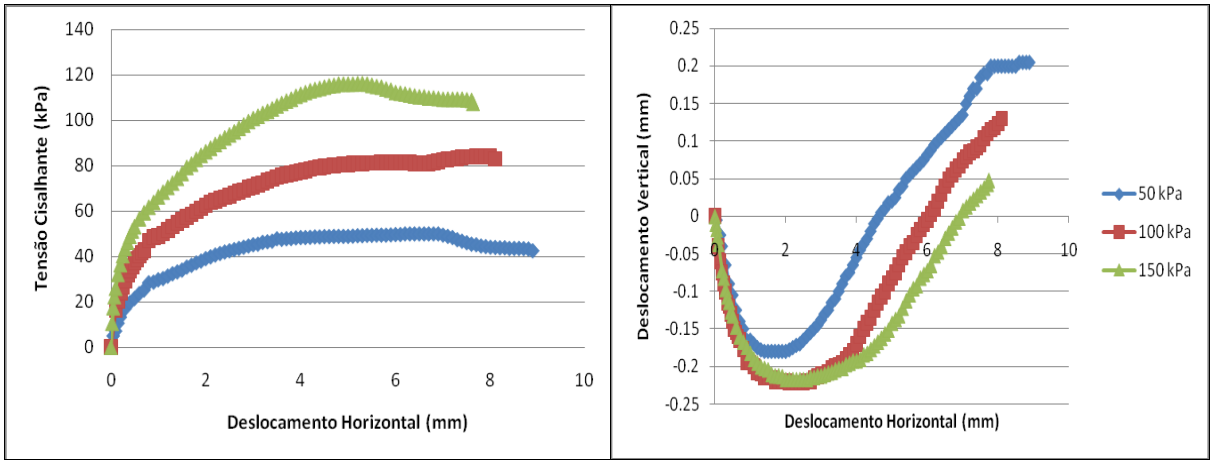
Na determinação das envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto, tanto para as análises de pico como para as residuais, foram determinadas linhas de tendência. Sendo que foram consideradas passagens obrigatórias no ponto de origem (0;0) do gráfico.

6.1.1 Areia de Osório

Os ensaios de cisalhamento direto com a areia de Osório seca foram realizados para os estados fofo e denso, ou seja, para os índices de vazios de 0,85 e 0,65, respectivamente. Os gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e de deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical são apresentados em conjunto para melhor análise dos resultados dos ensaios. As envoltórias de resistência de pico e residuais dos ensaios de cisalhamento direto são apresentadas posteriormente com os resultados de ângulo de atrito interno definidos, dados pela inclinação da linha de tendência. As figuras 17 e 18 apresentam os

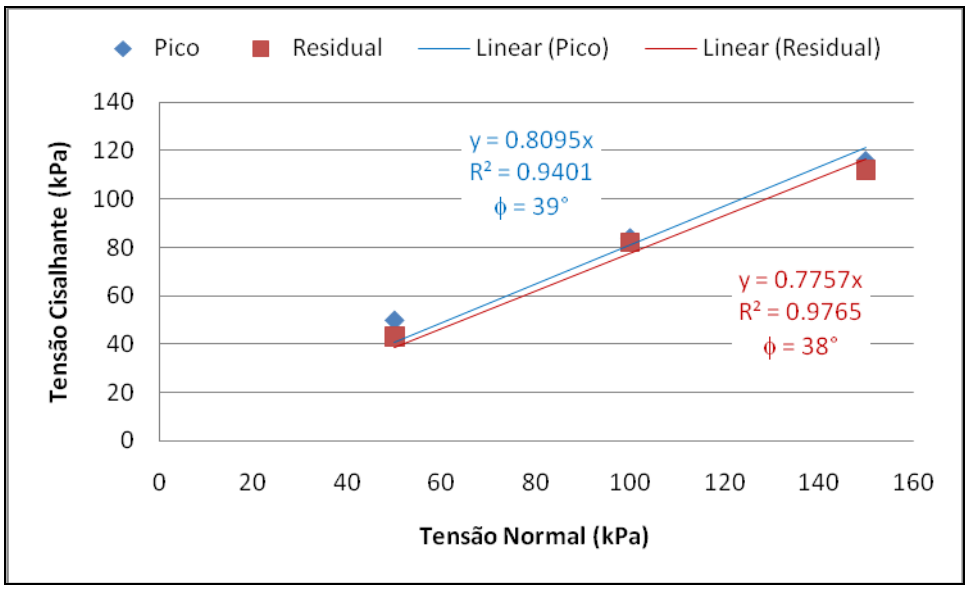
resultados obtidos para a areia de Osório no estado fofo e as figuras 19 e 20 para o estado denso. Os valores de ângulo de atrito interno, dados pelas inclinações das envoltórias de resistência, estão apresentados junto aos gráficos.

Figura 17 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado fofo



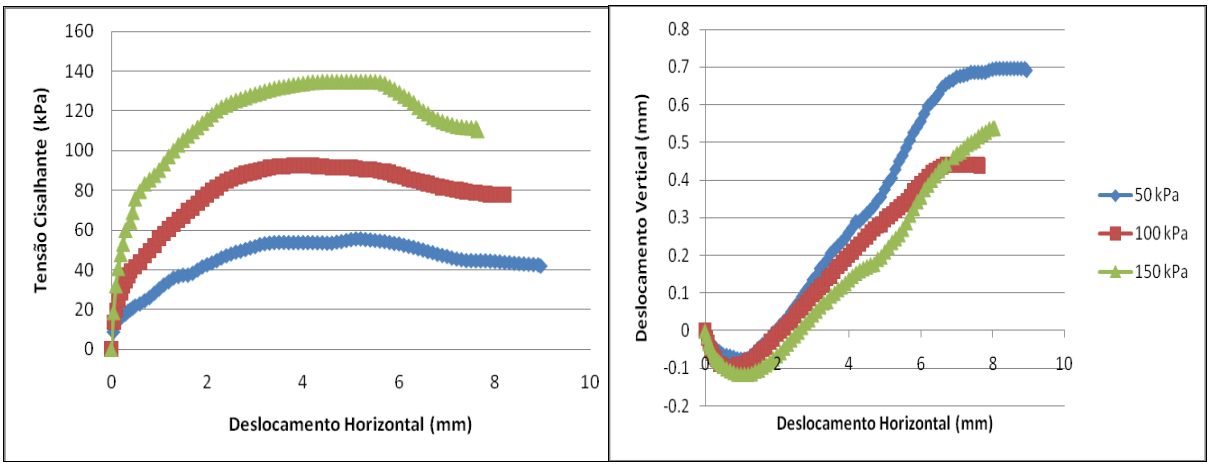
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 18 – Envoltória de resistência da areia de Osório seca no estado fofo



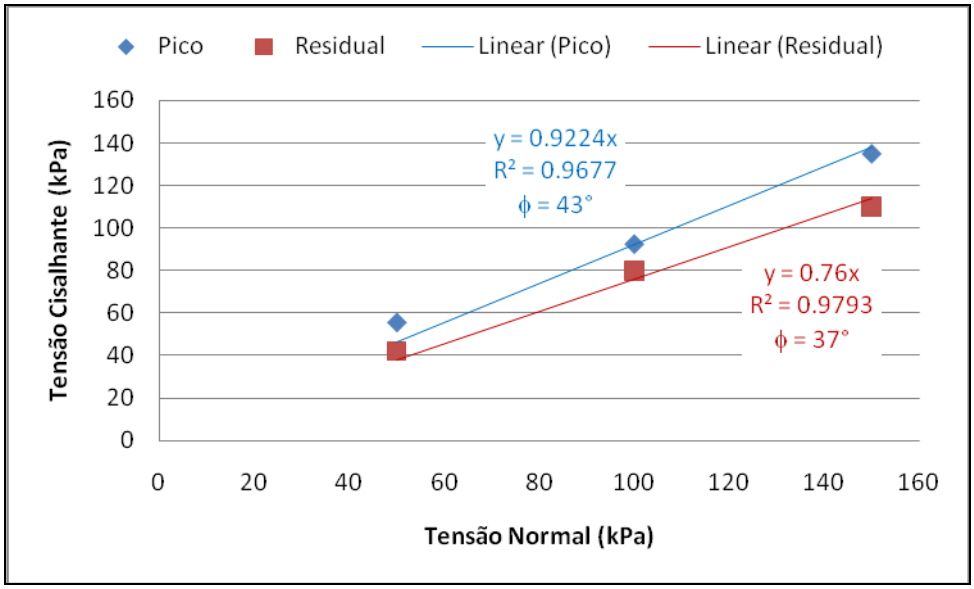
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 19 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado denso



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 20 – Envoltória de resistência da areia de Osório seca no estado denso



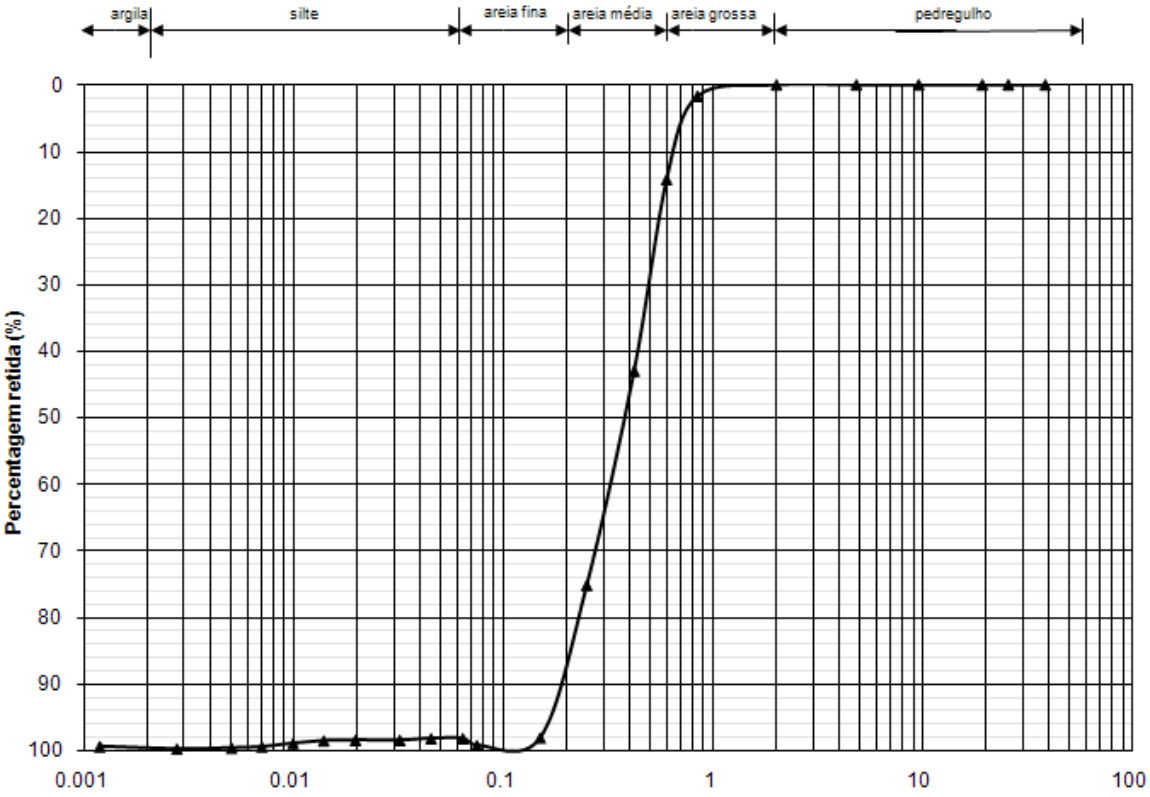
(fonte: elaborada pela autora)

6.1.2 Areia Média da Construção Civil

No Laboratório de Geotecnologia foram realizados o ensaio de granulometria por peneiramento e o ensaio de sedimentação com defloculante da areia média de construção civil para obter a curva granulométrica do solo, que está apresentada na figura 21. A areia média da construção civil é classificada, segundo sua curva granulométrica, como uniforme. Pelo

ensaio de peso específico real dos grãos foi encontrado o valor de γ_s igual a 25,75 kN/m^3 para esse solo.

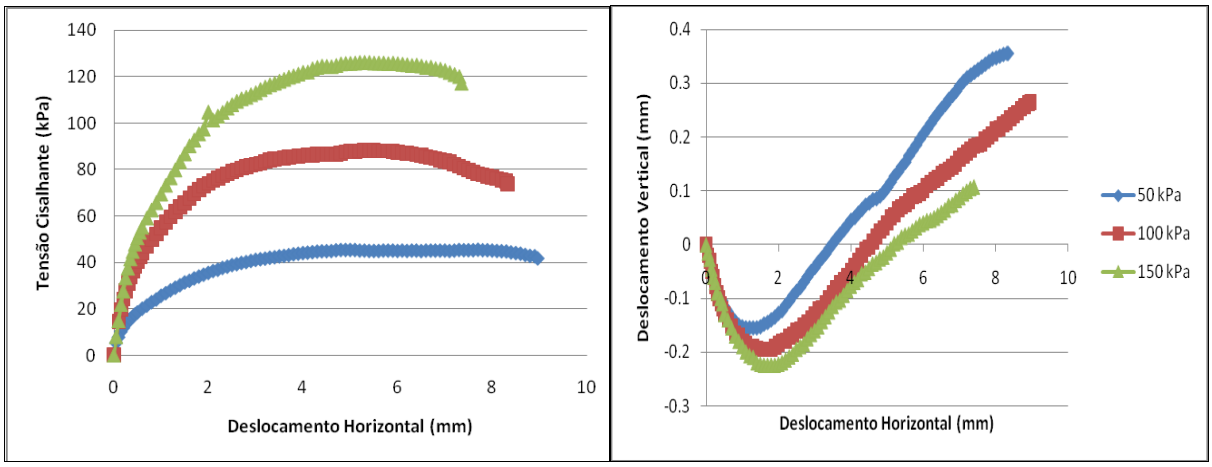
Figura 21 – Curva granulométrica da areia média de construção civil



(fonte: elaborada pela autora)

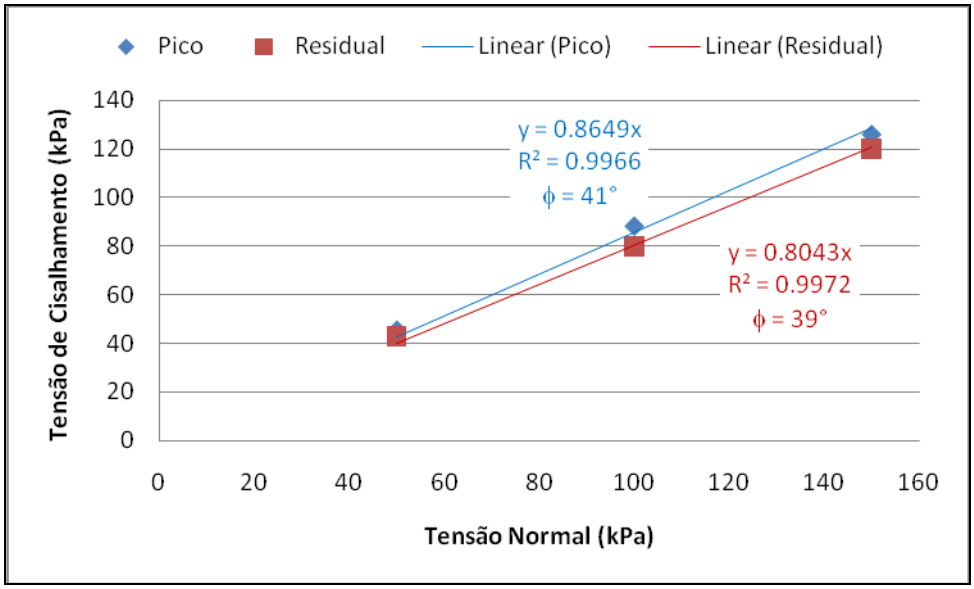
Os ensaios de cisalhamento direto com as areias médias de construção civil secas foram realizados para os estados fofo e denso, ou seja, para os índices de vazios de 0,80 e 0,65, respectivamente. A apresentação dos resultados segue o mesmo padrão utilizado para a areia de Osório, com os gráficos fornecidos pelo ensaio de cisalhamento direto e a envoltória de resistência de pico e residuais. As figuras 22 e 23 apresentam os resultados obtidos para a areia média de construção no estado fofo e as figuras 24 e 25 para o estado denso.

Figura 22 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado fofo



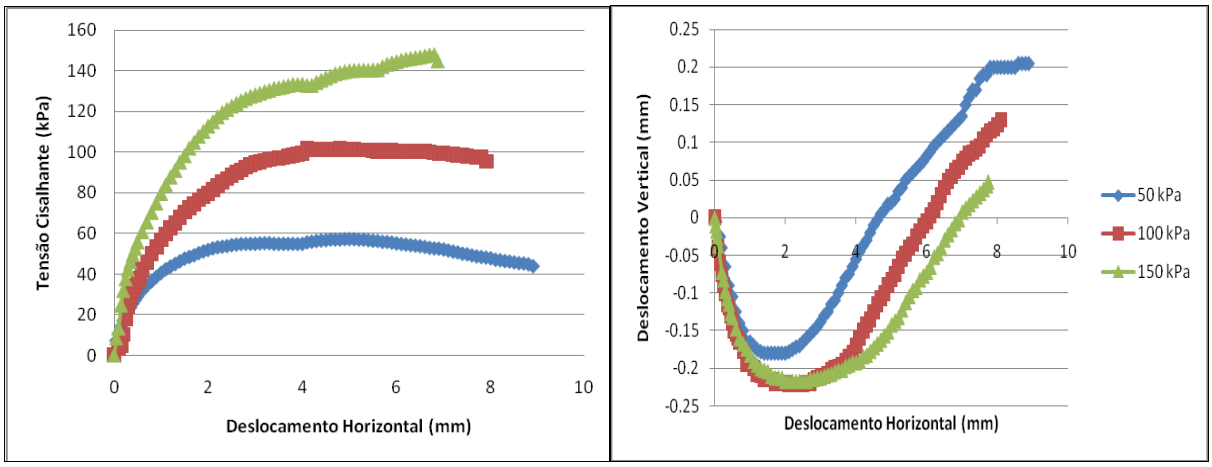
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 23 – Envoltória de resistência da areia média de construção seca no estado fofo



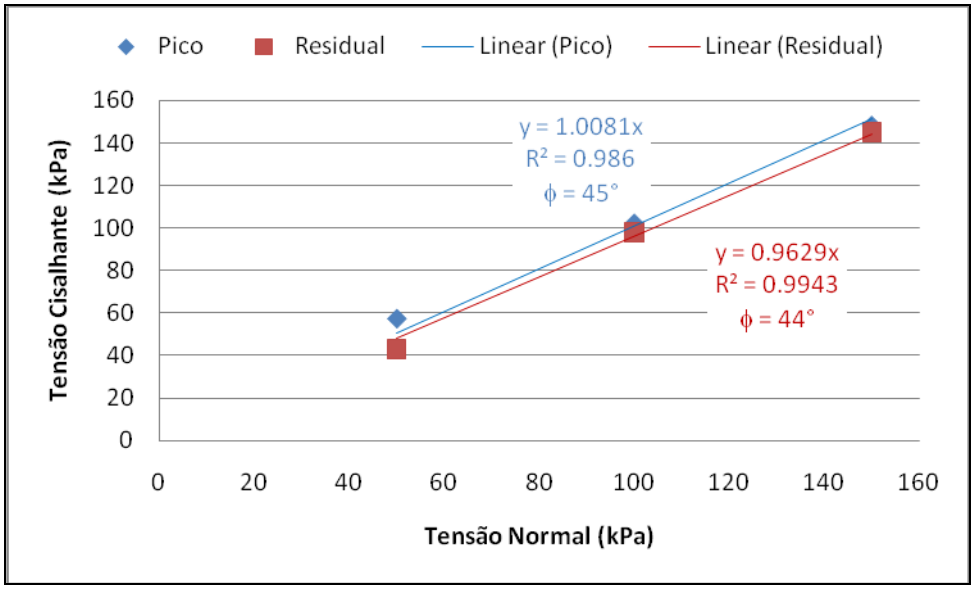
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 24 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado denso



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 25 – Envoltória de resistência da areia média de construção seca no estado denso



(fonte: elaborada pela autora)

6.2 RESISTÊNCIA DE INTERFACE GEOMEMBRANA E SOLOS ARENOSOS

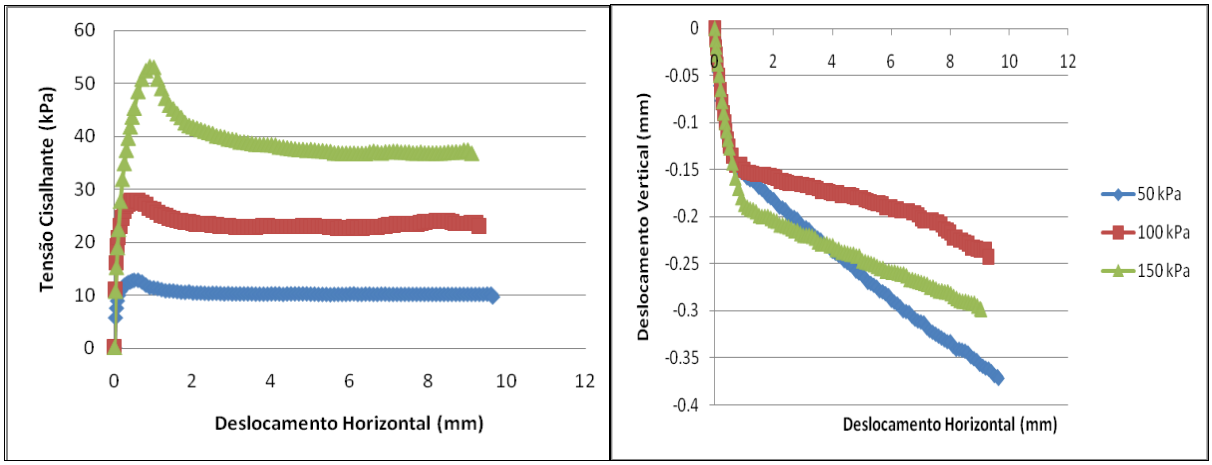
Os dados gerados para ensaios de cisalhamento direto com geomembranas são apresentados separadamente para geomembranas lisas e texturizadas, considerando os dois tipos de solo

estudados com dois índices de vazios. Para esse estudo foi considerada a aproximação das linhas de tendência passando pelo ponto (0;0), assim como ocorreu para os ensaios com os solos colocados, para obter dados confiáveis dos ângulos de interface.

6.2.1 Geomembrana Lisa

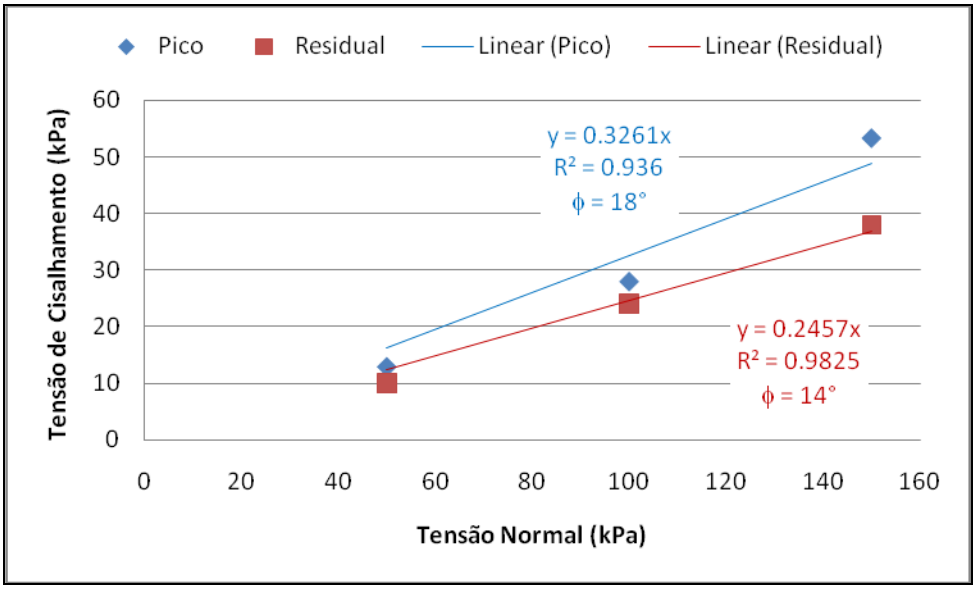
Os ensaios de cisalhamento direto para análise das interfaces com geomembranas lisas foram realizados para os estudos dos dois tipos de areia nos estados fofo e denso. Os dois primeiros resultados apresentados, representados nas figuras 26 a 29, são referentes aos estudos com areia de Osório e os outros dois, das figuras 30 a 33, com areia média de construção civil. Para ambas as análises se apresentam primeiro os gráficos para o solo fofo e depois para o denso.

Figura 26 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana lisa



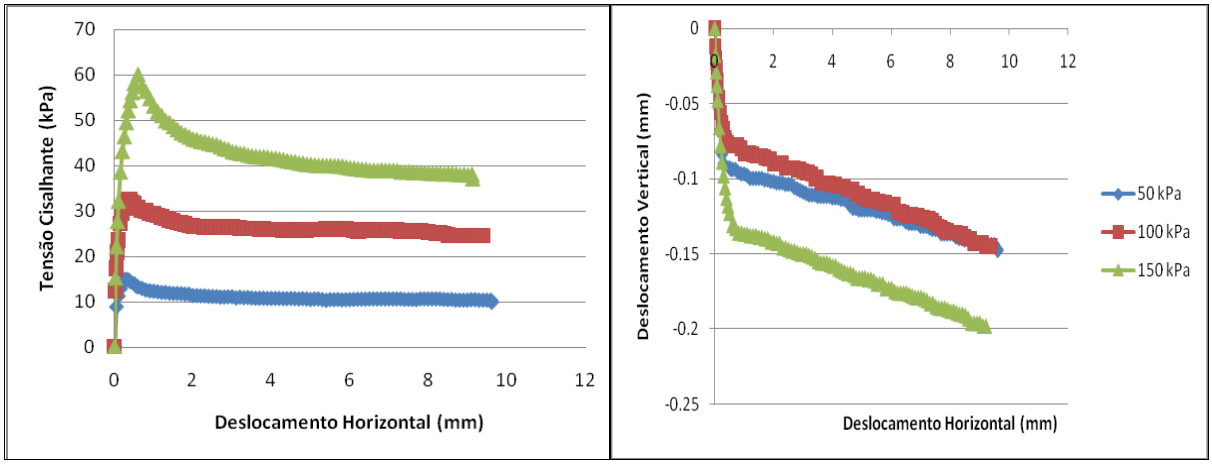
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 27 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana lisa



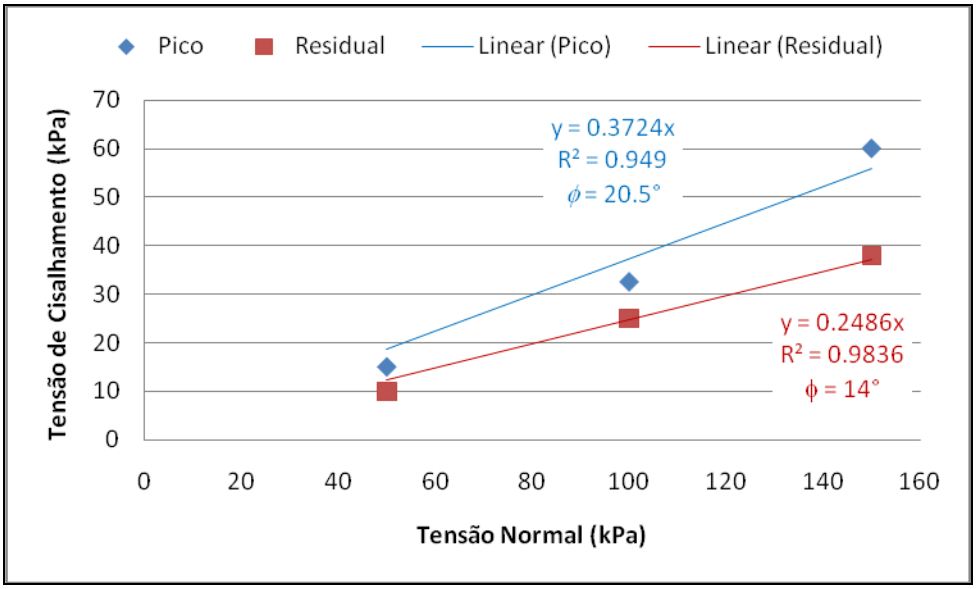
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 28 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana lisa



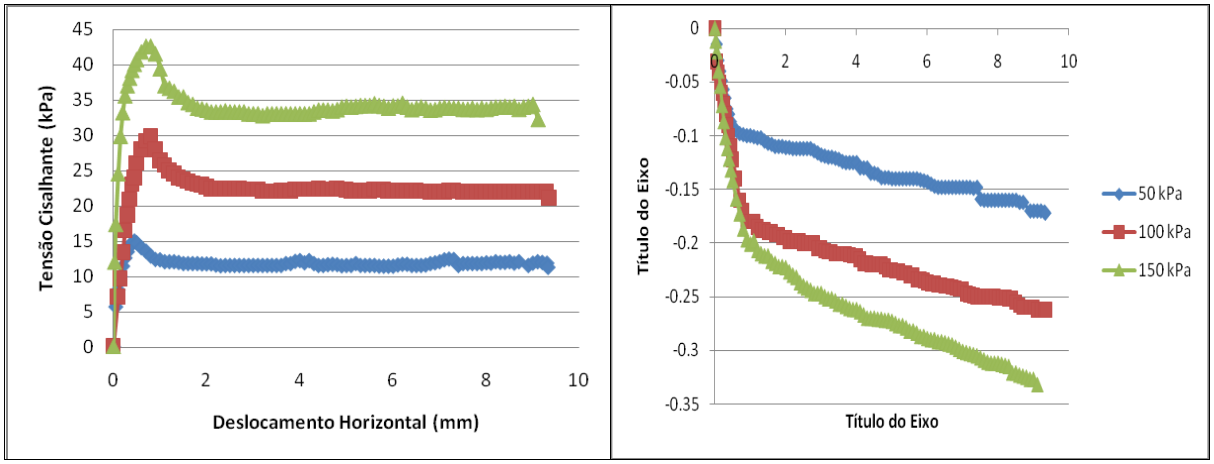
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 29 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana lisa



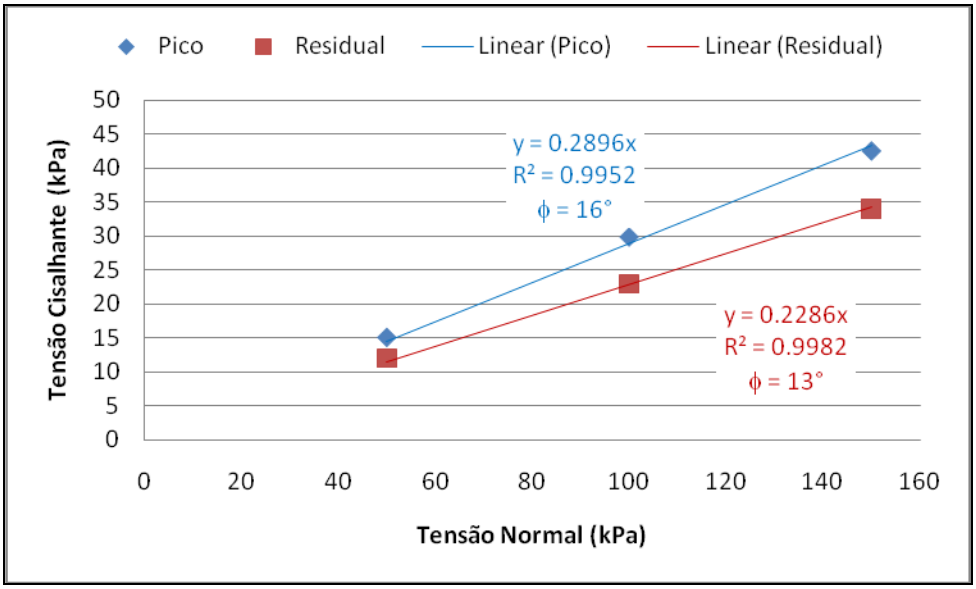
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 30 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana lisa



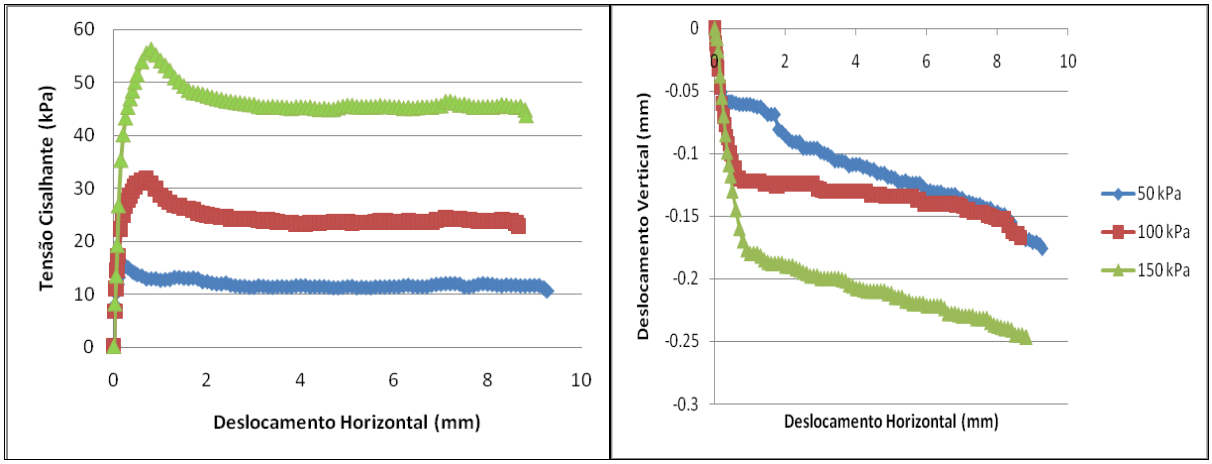
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 31 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana lisa



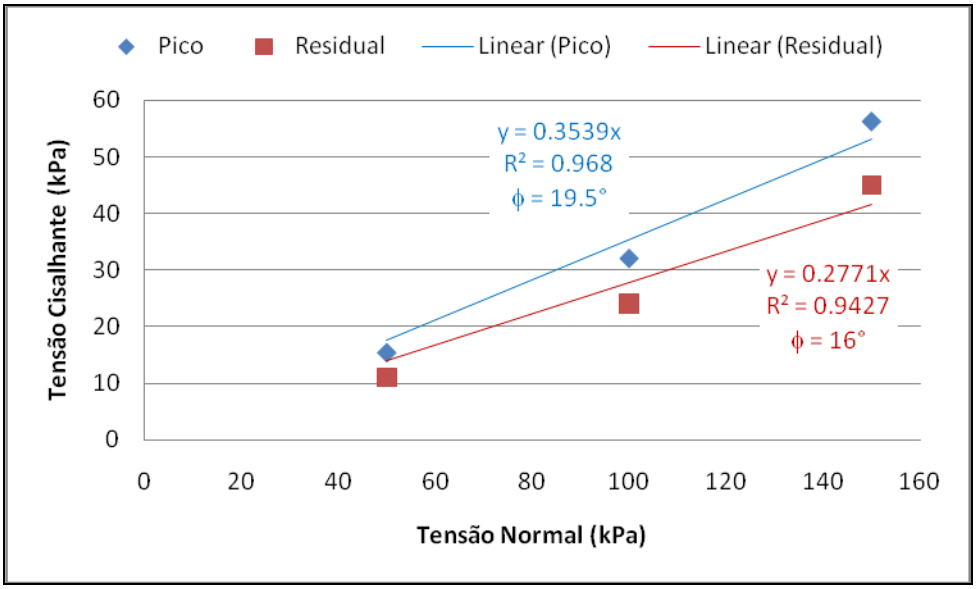
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 32 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana lisa



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 33 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana lisa

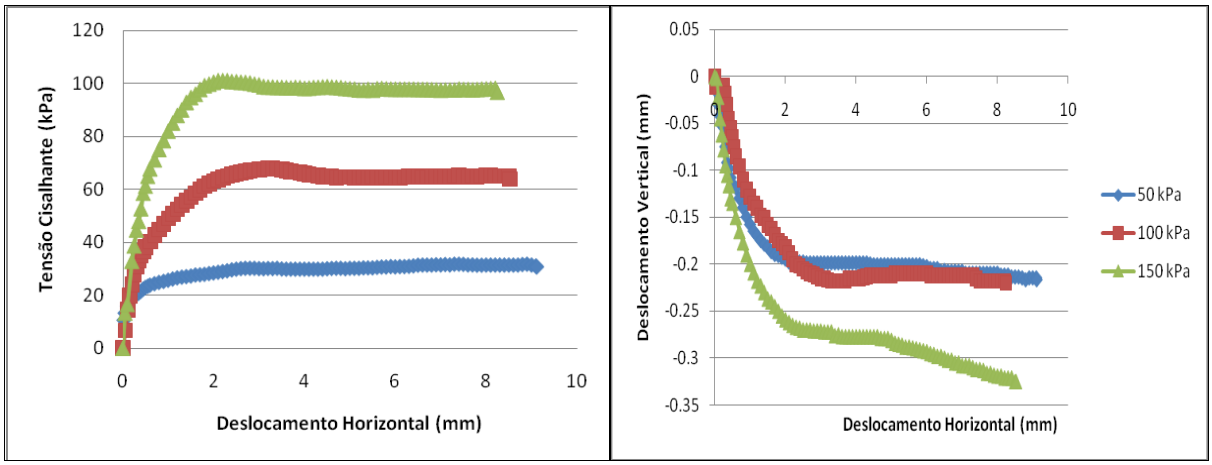


(fonte: elaborada pela autora)

6.2.2 Geomembrana Texturizada

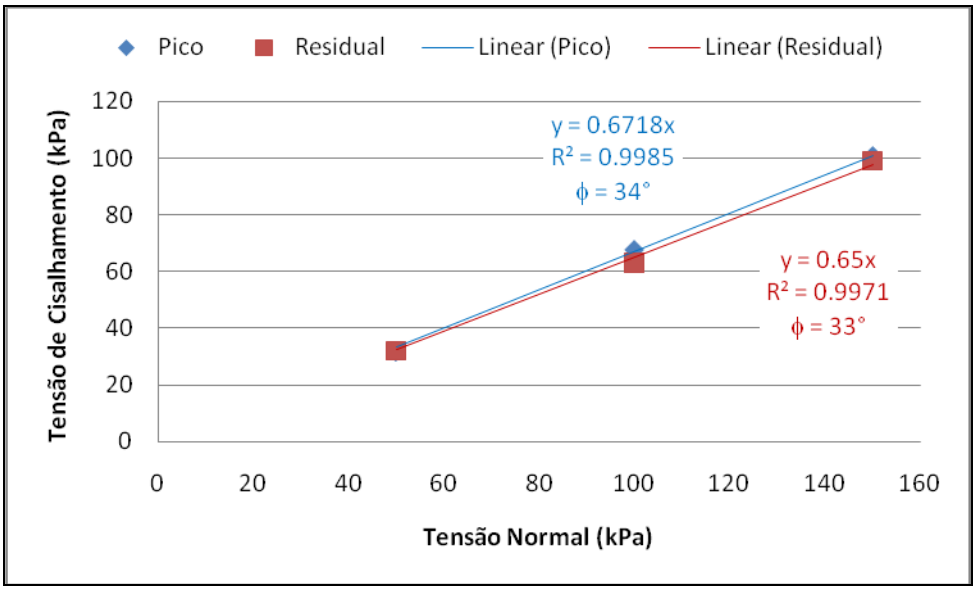
Os ensaios de cisalhamento direto, para análise das interfaces com geomembranas texturizadas, foram realizados para os dois tipos de areia com os estados fofo e denso. Os dois primeiros resultados apresentados, representados nas figuras 34 a 37, são referentes aos estudos como areia de Osório e os outros dois, das figuras 38 a 41, com areia média de construção civil. Para ambas as análises se apresentam primeiro os gráficos para o solo fofo e depois para denso.

Figura 34 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana texturizada



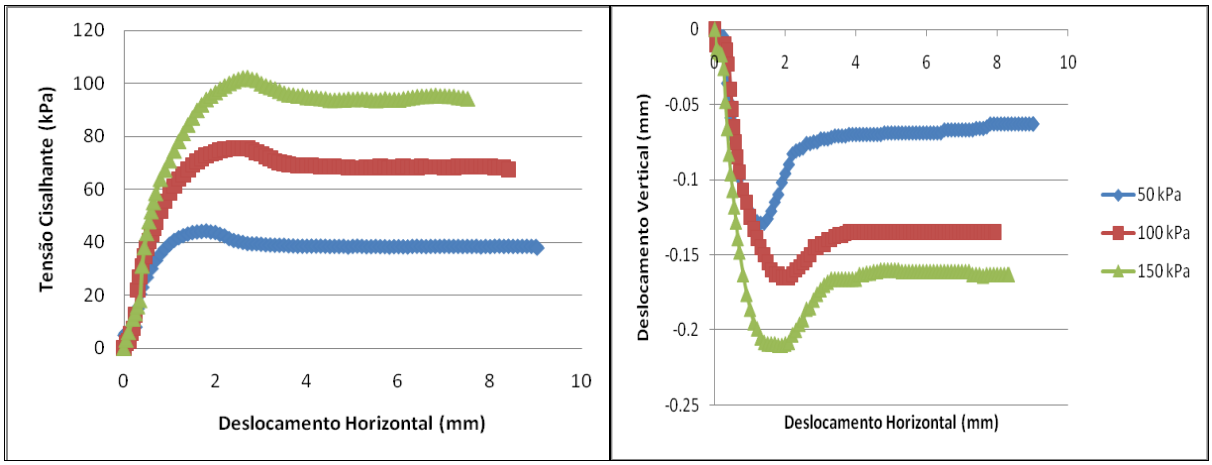
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 35 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado fofo com geomembrana texturizada



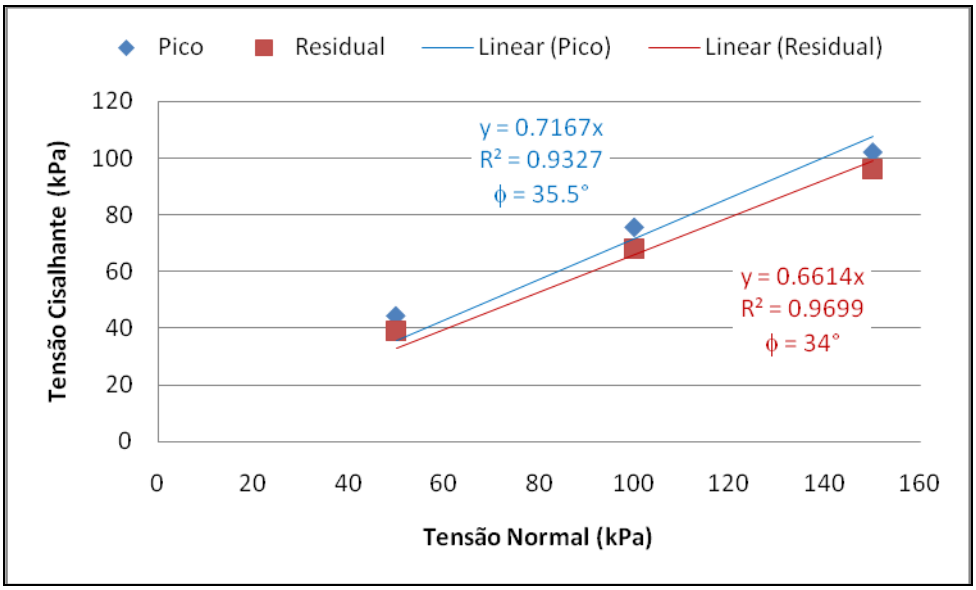
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 36 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana texturizada



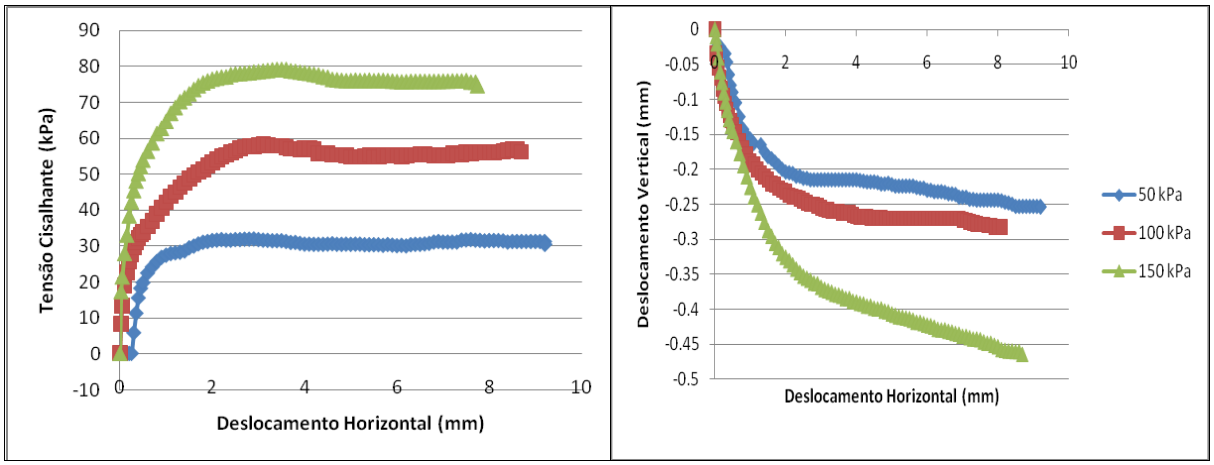
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 37 – Envoltória de resistência de interface da areia de Osório seca no estado denso com geomembrana texturizada



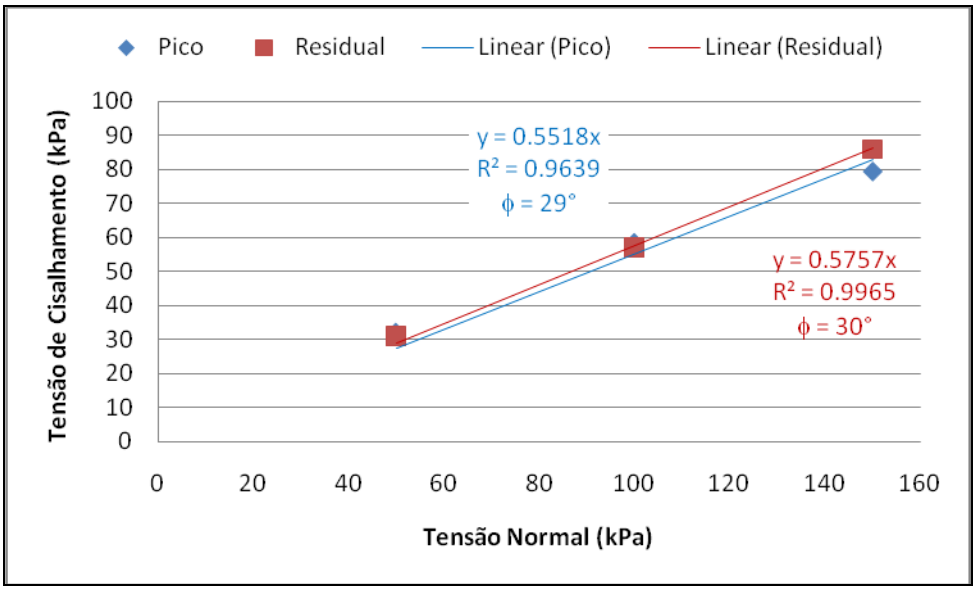
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 38 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana texturizada



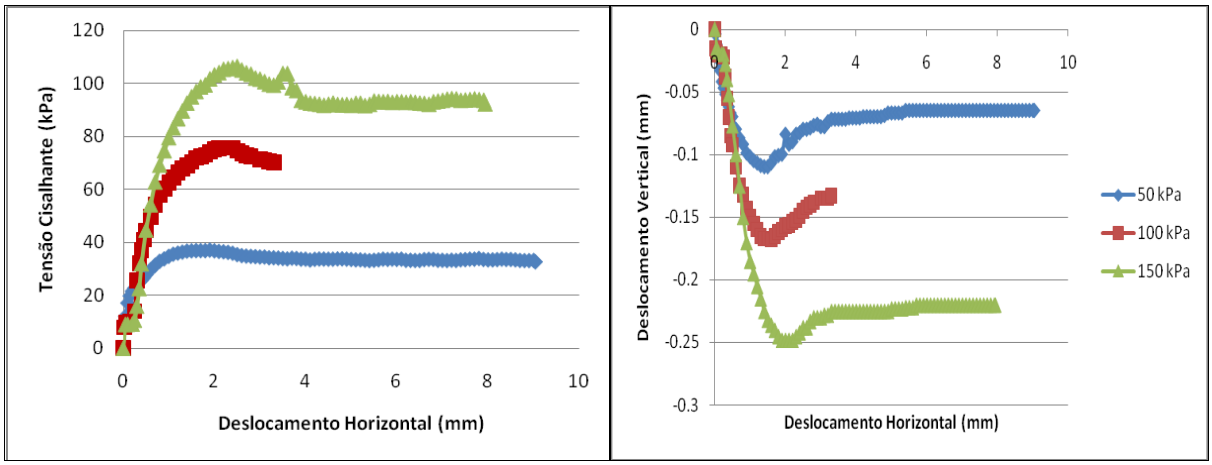
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 39 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado fofo com geomembrana texturizada



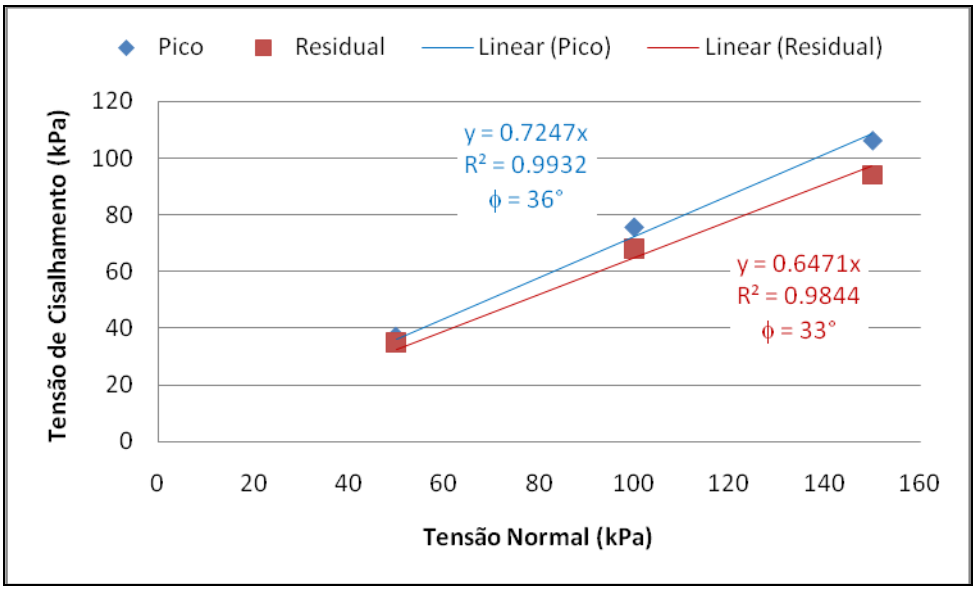
(fonte: elaborada pela autora)

Figura 40 – Gráficos de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante e deslocamento horizontal *versus* deslocamento vertical da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana texturizada[2]



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 41 – Envoltória de resistência de interface da areia média de construção seca no estado denso com geomembrana texturizada



(fonte: elaborada pela autora)

[2] Os resultados obtidos para a tensão normal de 100 kPa acima dos 2,80 mm foram inconclusivos, sendo desconsiderados no trabalho, uma vez que ocorreram para tensões menores que as de pico.

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Algumas interpretações podem ser realizadas com os resultados obtidos nesse estudo. As tabelas 8 e 9 resumem os resultados fornecidos nos itens 6.1 e 6.2 para melhor identificar e analisar as possíveis comparações. Na tabela 8 são colocados os resultados do ângulo de atrito interno de pico e residuais para ensaios com solos e na tabela 9 os ângulos de interface de pico e residuais para os estudos com geomembranas e areias.

Tabela 8 – Ângulos de atrito interno das areias estudadas

	Pico		Residual	
Areia	**Fofa**	**Densa**	**Fofa**	**Densa**
de Osório	39°	43°	38°	37°
Média da Construção	41°	45°	39°	44°

(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 9 – Ângulos de atrito de interface estudados

Pico				
Geomembrana	**Areia de Osório**		**Areia Média**	
	Fofa	**Densa**	**Fofa**	**Densa**
Lisa	18°	20,5°	16°	19,5°
Texturizada	34°	35,5°	29°	36°
Residual				
Geomembrana	**Areia de Osório**		**Areia Média**	
	Fofa	**Densa**	**Fofa**	**Densa**
Lisa	14°	14°	13°	16°
Texturizada	33°	34°	30°	33°

(fonte: elaborada pela autora)

Com os valores apresentados na tabela 9, pode-se notar que o ângulo de interface para as geomembranas texturizadas é maior do que para as lisas, tanto para os valores de pico como para os residuais. Nos valores ângulo de interface de pico se observa que o menor resultado apresentado para a geomembrana texturizada é de 29° e o maior valor para as lisas é de 19,5°,

ou seja, mesmo considerando os valores extremos dos ângulos de interface analisados, a variação é de 9,5°. Para a análise residual, apresenta-se com as geomembranas lisas o maior valor de 16°, enquanto para as texturizadas o menor valor é de 30°, tendo-se uma variação de 14°. Considerando o mesmo tipo de solo com índice de compactação similar as variações no ângulo de interface em média são aproximadamente 15° para análises de pico e 18° para as residuais.

Os valores de ângulo de interface para a mesma geomembrana e tipo de areia, variando apenas o índice de vazios, apresentam variações maiores para as areias média do que para as de Osório, tanto para as geomembranas texturizadas como para as lisas, para as análises de pico e residuais. Os valores máximos e mínimos observados são de 7° e 1,5° para as verificações do ângulo de interface de pico e 0° e 3° para as residuais. Como as variações são pouco significativas pode-se considerar que para os solos estudados os índices de vazios não interferem de maneira significativa nos ângulos de interface analisados.

Ainda com os valores apresentados na tabela 9, pode-se observar que os ângulos de interface são geralmente maiores para as areias de Osório, sendo que em quase todos as análises de pico as variações são maiores do que para as residuais. Assim, para areias de granulometrias finas os ângulos de interface são maiores que para granulometrias médias, sendo que as variações são mais significativas para as geomembranas texturizadas.

Comparando os valores apresentados nas tabelas 8 e 9, observa-se que os valores dos ângulos de interface são inferiores aos ângulos de atrito interno dos solos similares, tanto para análises com geomembranas lisas como com texturizadas para valores de pico e residuais. Porém a variação foi maior para os ensaios com a geomembrana lisa. Para análise generalista das variações para cada combinação de ensaio estudado, foi realizado o cálculo das eficiências, ou coeficientes de atrito, dado pela fórmula 6, apresentado no item 4.1.4, obtendo-se aos valores apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Eficiência ou coeficiente de atrito de cada ensaio realizado

Pico				
Geomembrana	Areia de Osório		Areia Média	
	Fofa	Densa	Fofa	Densa
Lisa	40%	40%	33%	35%
Texturizada	83%	76%	64%	73%
Residual				
Geomembrana	Areia de Osório		Areia Média	
	Fofa	Densa	Fofa	Densa
Lisa	32%	33%	29%	30%
Texturizada	83%	90%	71%	67%

(fonte: elaborada pela autora)

Analisando a tabela 10, observa-se que as menores eficiências ocorreram nos estudos com geomembranas lisas, ou seja, os ângulos de interface com geomembranas lisas possuem elevadas variações de valor em relação ao ângulo de atrito interno do solo. Para essa interface os estudos de pico mostram que o coeficiente de atrito máximo é de 40% e para os ensaios com geomembranas texturizadas são apresentadas maiores eficiências, ou seja, os ângulos de interface, dos estudos areia-geomembrana, estão mais próximos dos valores de ângulo de atrito interno da mesma areia com índice de vazios similar. Para os valores de pico, similarmente, o aumento da eficiência também ocorre na comparação de texturização das geomembranas. Comparando os resultados para pico e residuais observam-se menores eficiências nas análises residuais quando estudadas as geomembranas lisas. Porém para as texturizadas nota-se a tendência de possuírem maiores eficiências para as residuais.

As eficiências não possuem muita variação para mudanças apenas no índice de vazios, conforme apresentado na tabela 10. Estudos das areias de Osório fofas e densas com geomembranas lisas não apresentaram variação significativa nas eficiências, sendo para ambos os índices de vazios de 40% para pico e 33,5% em média para as residuais. Variação muito baixa também é mostrada para as areias médias de construção civil para o mesmo tipo de geomembrana, ou seja, para as lisas. Nas geomembranas texturizadas as variações são maiores, chegando aos valores de no máximo 64% no estado fofo e 73% no denso para as areias médias nas análises de pico e 83% e 90% para as areias de Osório nas análises residuais.

7 CONCLUSÕES

Dentro de um sistema de impermeabilização, a resistência da interface é controlada pelas características dos materiais que compõem a estrutura solo-geomembrana. Diferentes modificações nas características dos ensaios implicam variações distintas nos valores dos ângulos de interface, devendo, por isso, cada caso de aplicação prática ser analisado individualmente com ensaios de laboratório, buscando a situação mais similar às utilizadas em campo. Para esse estudo, foram analisadas com base em ensaios de cisalhamento direto as interfaces de geomembranas lisas e texturizadas com dois tipos de areias, uma de granulometria fina e outra média, com dois índices de vazios distintos. Foi possível observar que os valores dos ângulos de interface de pico e residuais são dependentes conjuntamente de uma série de fatores e combinações de características, tanto dos geossintéticos como dos solos. Porém, alguns comportamentos são particularmente característicos para determinadas variações nas combinações dos ensaios, portanto essas alterações de comportamento compõem o principal objetivo de estudo do trabalho.

Na curva tensão cisalhante *versus* deslocamento observou-se um comportamento muito dependente da textura da geomembrana. Para geomembranas lisas, a resistência de pico é mobilizada em pequenos deslocamentos, sendo geralmente da ordem de no máximo um milímetro, apresentando quedas elevadas após o pico. Em geomembranas rugosas as resistências de pico se mobilizam entre dois e quatro milímetros, com quedas pós-pico geralmente pouco pronunciadas.

Os valores de ângulo de atrito interno aumentam suavemente com a diminuição dos índices de vazios, quando analisados os estudos efetuados com mesmos tipos de areia e geomembranas. Porém, as variações nos valores do ângulo de interface são maiores para geomembranas rugosas com areias médias, tanto nas análises de pico como nas residuais. Analisando as combinações adotadas nesse estudo, a variação máxima obtida foi de 7° e a mínima de 1,5°, ambas para as geomembranas texturizadas para as de pico e 3° máximo e 0° mínimo para as residuais. Considerado as eficiências, para os estudos de pico e residuais, pode-se notar que os ângulos de interface são proporcionais aos valores de ângulo de atrito interno do solo, sendo que quanto maior a compactação da areia mais resistente será a interface estudada.

Pôde-se observar que os valores dos ângulos de interface são maiores para geomembranas texturizadas do que para as lisas. Considerando valores extremos, o menor valor observado de pico para a geomembrana texturizada foi de 29° e o maior valor para as lisas é de 19,5°, ou seja, a variação mínima teórica, desconsiderando compatibilização de outros fatores, é de 9,5°. Verificando similarmente as residuais nas texturizadas o valor mínimo é de 30° e nas lisas o valor máximo é de 16°, o que resulta em uma variação de 14°. As variações apresentadas nos valores de ângulo de interface para os casos estudados, com mesma areia em condições de compactação similares, foram de 13° até 16,5° para os valores de pico e 17° até 20° para os valores residuais. Isso significa que o rompimento da interface possui relação muito direta com a rugosidade da superfície da geomembrana, sendo essa a principal característica da combinação estudada a influenciar nas resistências de pico da estrutura solo-geomembrana.

Analisando as eficiências, as geomembranas rugosas possuem ângulos de interface mais próximos aos valores de ângulo de atrito interno apresentados pelo solo com características de compactação semelhantes, ou seja, maiores valores de coeficientes de atrito. Isso indica que as resistências de interfaces de geomembranas texturizadas com solos arenosos dependem diretamente e principalmente da rugosidade da superfície do geossintético. Esse ponto fica claro quando se observa as baixas eficiências em geomembranas lisas, ou seja, tanto para as análises de pico como residuais o rompimento depende diretamente da texturização da geomembrana.

Para a faixa de variação de granulometria dos solos arenosos estudados não houve muita variação nos valores de ângulo de interface obtidos. Apesar da baixa variação apresentada para a faixa granulométrica estudada, considera-se que seriam necessários estudos com granulometrias maiores para verificar para quais tamanhos de grãos o ângulo de interface pode variar de maneira mais acentuada.

Como sugestões para futuros trabalhos são indicados estudos com solos não arenosos para a verificação das suas interferências nos ângulos de interface com as geomembranas estudadas. Também poderia ser verificada a influência da água na resistência das interfaces, tanto com solos arenosos para os demais tipos de solos. Análises das resistências a baixas tensões também seriam importantes para compreender o comportamento das envoltórias de

resistência. Outro ponto interessante de estudo futuro seria a análise das resistências residuais da interface utilizando outros tipos de ensaio que não o de cisalhamento direto.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, V. R. **Ensaios de rampa para estudo da resistência de interfaces solo-geossintético**. 2003. 105 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5321**: test method for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. West Conshohocken, 2008.

_____. **D4439**: terminology for geosynthetics. West Conshohocken, 2011a.

_____. **D7176-06**: specification for non-reinforced polyvinyl chloride (PVC) geomembranes used in buried applications. West Conshohocken, 2011b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a.

_____. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.

_____. **NBR 12.553**: geossintéticos: terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

BUENO, B. S. Propriedades. Especificações. Ensaios. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 4., 2003, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: ABMS-IGS Brasil, 2003, p. 163-176.

BUENO, B. S.; VALENTIN, C. A.; MOSSIN, V. Um panorama do desempenho de geossintéticos comercializados no país sob a ótica de ensaios de laboratório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 5., 2007, Recife. **Anais...** São Paulo: ABMS/IGS-Brasil, 2007, p. 1-8. v. 1.

COLMANETTI, J. P. **Estudo sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento**. 2006. 272 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Pioneira, 2007.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro-reforçado com fibras de distintos índices aspecto.** 2008. 195 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FROEBEL, R. K. Geomembranes in surface barriers. **Barrier technologies for environmental management:** summary of a workshop. Washington: The National Academy of Sciences, p. D71-D78, 1997. Disponível em: <http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=5539&page=89>. Acesso em: 20 fev. 2012.

GEROTO, R. E. **Desempenho das camadas de proteção para geomembranas**. 2008. 188 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

GEOSYNTHETIC INSTITUTE. **GRI test method GM13**: test methods, test properties and testing frequency for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranes. Folsom, 2011. Disponível em: <http://www.geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2012.

INGOLD, T. S. Friction Testing. In: ROLLING, A.; RIGO, J. M. **Geomembranes:** identification and performance testing. Cambridge: Chapman and Hall, 1991. p 176-203. v. 2.

IZGIN, M.; WASTI, Y. Geomembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, n. 4, p. 207-219, 1998. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114498000107>. Acesso em: 28 jan. 2012.

KOERNER, R. M. Geomembrane overview: significance and background. In: ROLLING, A.; RIGO, J. M. **Geomembranes:** identification and performance testing. Cambridge: Chapman and Hall, 1991, p. 3-21. v. 2.

_____. **Designing with geomembranes**. New Jersey: Pearson, 2005.

LODI, P. C. **Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila) (PVC)**. 2003. 284 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

PVC GEOMEMBRANE INSTITUTE. **PGI-1104**: specification for PVC geomembranas. Champaign, 2003. Disponível em: <http://www.geomembrane.com/PVC/pgi1104spec.htm>. Acesso em: 12 fev. 2012.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PITANGA, H. N. J. P.; GOURC, ; VILAR O. M. . Interface shear strength of geosynthetics: evaluation and analysis of inclined plane tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 27, n. 6, p. 435-446, 2009. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114409000521>. Acesso em: 11 fev. 2012.

REBELO, K. M. W. **Resistência de interface entre geomembrana e solos através do ensaio *ring shear***. 2003. 194 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

RIGO, J. M.; CAZZUFFI, D. A. Test Standard and their Classification. In: ROLLING, A.; RIGO, J. M. **Geomembranes:** identification and performance testing. Cambridge: Chapman and Hall, 1991. p 22-58. v. 2.

SAYÃO, A.; SIEIRA, A. C.; SANTOS, P. **Manual técnico Maccaferri:** reforço de solos. São Paulo: Maccaferri, 2009. Disponível em: <http://www.maccaferri.com.br/download/manual_reforco_por.pdf?PHPSESSID=omj079q54nlch3tpirlmilkdk0>. Acesso em: 28 jan. 2012.

SHARMA, H. D.; LEWIS, S. P. **Waste containment systems, waste stabilization, and landfills:** design and evaluation. New York: John Wiley & Sons, 1994.

STARK, T. D.; POEPPEL, A. R. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York , v. 120, n. 3, p. 597-615, Mar. 1994. Disponível em: <https://netfiles.uiuc.edu/tstark/website/Journal_Papers/JP11.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2012.

TEIXEIRA, S. H. C. **Estudo da interação solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados**. 2003. 218 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

VAID, Y. P.; RINNE, N. Geomembrane coefficients of interface friction. **Geosynthetics Internatinal**, v. 2, n. 1, p. 309-325, 1995. Disponível em: <http://www.geosyntheticssociety.org/Resources/Archive/GI/src/V2I1/GI-V2-N1-paper2.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2012.

VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. São Paulo: Editora Edgard Blüc, 2004.

WINGLER, K. M. R.; VILAR, O. M. Estudo da resistência de interface entre solos e geomembranas através do ensaio de *ring shear*. **Pesquisa e Tecnologia Minerva**, São Carlos, SP, v. 2, n. 1, p. 41-51, 2005. Disponível em: <http://www.fipai.org.br/Minerva%2002%2801%29%2005.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2012.