

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Natália Dantas Arruda

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA ENTRE INTERFACES DE AREIA E
GEOMEMBRANAS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO
DIRETO**

Santa Maria, RS
2022

Natália Dantas Arruda

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA ENTRE INTERFACES DE AREIA E
GEOMEMBRANAS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Maria como
parte dos requisitos para obtenção do grau de
Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni

Coorientadora: Eng. Civil Gabriéli Pires Chiarello

Santa Maria, RS
2022

Natália Dantas Arruda

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA ENTRE INTERFACES DE AREIA E
GEOMEMBRANAS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Maria como
parte dos requisitos para obtenção do grau de
Engenheira Civil.

Aprovado em 11 de fevereiro de 2022:

Magnos Baroni, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Eng. Civil Gabriéli Pires Chiarello (UFSM)
(Coorientadora)

Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)

Ezequiel Andrei Somavilla, MSc.

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que me dão a certeza de apoio em todos os momentos. Especialmente ao meu pai, mãe e irmã, muito obrigada por tudo. Gabriel, obrigada por estar sempre ao meu lado.

Aos amigos que fiz durante a graduação, sem eles a caminhada teria sido mais difícil.

Ao meu orientador Magnos Baroni pela disponibilidade em orientar esse trabalho, além da dedicação como professor.

À minha coorientadora, Gabriéli Chiarello, por toda a ajuda, apoio e ensinamentos durante essa etapa.

À Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos que possibilitou esse estudo através da doação de material para pesquisa.

À banca examinadora, professor Rinaldo Barbosa e Engenheiro Ezequiel Somavilla, pela disposição dedicada à avaliação desse trabalho.

RESUMO

ESTUDO DA RESISTÊNCIA ENTRE INTERFACES DE AREIA E GEOMEMBRANAS POR MEIO DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

AUTORA: Natália Dantas Arruda

ORIENTADOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

COORIENTADORA: Gabriéli Pires Chiarello

Os aterros sanitários têm surgido como alternativa viável tecnicamente para a disposição de resíduos sólidos urbanos. Para evitar a contaminação do solo e da água, as geomembranas são amplamente utilizadas em aterros nas camadas de impermeabilização de base e taludes. Esse material impossibilita a percolação do lixiviado para o solo e águas subterrâneas e superficiais. Uma configuração muito utilizada de impermeabilização de base de aterros é a geomembrana combinada com areia. A areia é um material inerte que garante a proteção mecânica dessas camadas impermeabilizantes frente a ação de cargas externas, como por exemplo, maquinário mecânico. Conhecer os parâmetros de resistência de interface entre esses materiais é importante, em especial para obter dados sobre a estabilidade dos elementos que compõe a estrutura. Assim, o objetivo principal dessa pesquisa é verificar a resistência ao cisalhamento de interface entre geomembranas e duas frações granulométricas de uma areia na condição inundada para diferentes tensões aplicadas. Para isso, dois tipos de geomembrana foram utilizadas: lisa e texturizada. Verificou-se que a rugosidade das geomembranas e a granulometria da areia influenciam significativamente a resistência de interface dos corpos de prova. O maior ângulo de atrito obtido foi para a interface areia x areia, seguido da interface areia x geomembrana texturizada e por último areia x geomembrana lisa. Quanto a granulometria da areia, obteve-se maiores ângulos de atrito para interfaces com areia de granulometria mais grossa.

Palavras-chave: Areia; Geomembrana; Resistência; Cisalhamento.

ABSTRACT

STUDY OF RESISTANCE BETWEEN SAND INTERFACES AND GEOMEMBRANE THROUGH RESEARCH OF DIRECT SHEAR FORCE

AUTHOR: Natália Dantas Arruda

ADVISOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

CO-SUPERVISOR: Eng. Civil Gabriéli Pires Chiarello

Landfills have become a viable technical alternative for the disposition of solid urban residuals. To avoid soil and water contamination, geomembranes are commonly utilized on waterproof base surfaces and slopes of landfills. This material prevents soil and water percolation of leached substances. A common combination to waterproof the base of landfills is to combine the geomembrane with sand. Sand is an inert material that guarantees the mechanical protection of the waterproof layers from external load action, such as heavy machinery. It is important to know the interface resistance parameters between these materials to avoid a rupture in the waterproofed system. Therefore, the main objective of this research is to verify the interface shear force resistance between geomembranes and two granulometric layers of sand with inundated conditions under different applied tensions. For this, two types of geomembranes were utilized: smooth and textured. It was found that geomembrane roughness and sand granulometry were of the significant influence of the shear force resistance of these interfaces. In general, the highest friction angle was obtained on the sand x sand interface, following the sand x textured geomembrane interface and lastly sand x smooth geomembrane. As for the sand granulometry, it was obtained the highest friction angle for interfaces with rougher granulometry.

Key words: Sand; Geomembrane; Resistance; Shear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do funcionamento de um aterro sanitário	16
Figura 2 - Diversas aplicações das geomembranas	19
Figura 3 – Ruptura do aterro de Kettleman Hills.....	21
Figura 4 - Esquema do equipamento de cisalhamento direto.....	23
Figura 5 - (a) Representação de resultado típico de ensaio; (b) Envoltória de resistências.....	24
Figura 6 - Gráficos de cisalhamento para areias fofas: (a) curva tensão-deformação; (b) variação volumétrica; (c) curva tensão normal x tensão cisalhante.....	24
Figura 7 - Gráficos de cisalhamento para areias compactas: (a) curva tensão-deformação; (b) variação volumétrica; (c) curva tensão normal x tensão cisalhante.....	25
Figura 8 – Fluxograma da pesquisa.	27
Figura 9 – Geomembranas utilizadas: (a) geomembrana texturizada; (b) geomembrana lisa.....	29
Figura 10 – Preparação da amostra para o ensaio de massa específica: (a) material coberto com água; (b) amostra secando ao ar; (c) amostra sendo revolvida; (d) amostra parcialmente desmoronada	30
Figura 11 - Areia e água destilada em repouso para o ensaio de massa específica	31
Figura 12 – Granulometria média e grossa peneirada.....	32
Figura 13 – Granulometria fina peneirada	32
Figura 14 – Materiais utilizados no ensaio de índice de vazios: (a) Cilindro de Proctor; (b) demais materiais; (c) peso aplicado nos corpos de prova.....	33
Figura 15 - Preparação do cilindro de Proctor para ensaio	34
Figura 16 - Cilindro de Proctor preparado para o ensaio.....	34
Figura 17 - Corpo de prova preparado para ensaio de cisalhamento direto	35
Figura 18 – Mesa vibratória utilizada para preparação dos corpos de prova.....	35
Figura 19 - Geomembrana danificada após ensaio.....	36
Figura 20 – Aparelho de cisalhamento direto.	37
Figura 21 - Corpos de prova cisalhados (a) Interface areia x areia: (b) Interface areia x geomembrana.....	39
Figura 22 - Curva granulométrica da areia.	40
Figura 23 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia A x areia A	43

Figura 24 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia A x areia A	43
Figura 25 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia A x areia A	44
Figura 26 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia A x Geomembrana lisa.....	44
Figura 27 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia A x Geomembrana lisa.....	45
Figura 28 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia A x Geomembrana lisa.....	45
Figura 29 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia A x Geomembrana texturizada.....	46
Figura 30 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia A x Geomembrana texturizada.....	46
Figura 31 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia A x Geomembrana texturizada.....	47
Figura 32 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia B x areia B	47
Figura 33 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia B x areia B	48
Figura 34 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia B x areia B	48
Figura 35 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia B x Geomembrana lisa.....	49
Figura 36 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia B x Geomembrana lisa.....	49
Figura 37 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia B x Geomembrana lisa.....	50
Figura 38 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia B x Geomembrana texturizada.....	50
Figura 39 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia B x Geomembrana texturizada.....	51
Figura 40 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia B x Geomembrana texturizada.....	51

Figura 41 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces com areia A	54
Figura 42 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces com areia B	55
Figura 43 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces areia x areia	56
Figura 44 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana lisa	57
Figura 45 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana texturizada.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre parâmetros de resistência obtidos via ensaios de plano inclinado e ensaios de cisalhamento direto.	22
Tabela 2 - Ângulos de atrito de interfaces estudados.....	23
Tabela 3 - Propriedades das geomembranas.....	29
Tabela 4 - Número de ensaios realizados	38
Tabela 5 - Parâmetros da curva granulométrica.....	41
Tabela 6 - Caracterização física da areia	42
Tabela 7 - Índice de vazios máximo e mínimo das areias estudadas	42
Tabela 8 - Ângulos de atrito interno das areias e ângulos de atrito de interfaces	53
Tabela 9 - Eficiência do estudo das interfaces	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 ATERRO SANITÁRIO.....	15
2.2 LINERS	17
2.3 GEOMEMBRANAS.....	18
2.4 ESTABILIDADE DE ATERROS SANITÁRIOS.....	20
2.5 INTERFACES ESTUDADAS.....	21
2.6 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	23
2.7 COMPORTAMENTO TÍPICO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	24
3 METODOLOGIA	27
3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA	27
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	28
3.3. MÉTODOS.....	30
3.3.1 Massa específica	30
3.3.2 Granulometria	31
3.3.3 Determinação do índice de vazios máximo e mínimo	33
3.3.4 Preparação dos corpos de prova	34
3.3.5 Etapa de laboratório.....	37
4 RESULTADOS E ANÁLISES	40
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	40
4.2 CISALHAMENTO DIRETO.....	42
4.2.1 Areia A	43
4.2.2 Areia B	47
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
4.3.1 Influência da rugosidade da geomembrana.....	54
4.3.2 Influência da granulometria da areia.....	56
5 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Em virtude do crescimento urbano apresentado nos últimos anos, a geração de resíduos vem aumentando drasticamente aliada a redução da capacidade do meio ambiente de absorvê-lo. Portanto, a disposição correta dos resíduos apresenta-se como um desafio para a sociedade atual. Apesar da crescente conscientização da sociedade acerca das técnicas de gerenciamento que buscam reduzir, reciclar e reaproveitar os resíduos produzidos, ainda restam resíduos que necessitam serem dispostos. Entre as alternativas existentes, destaca-se a disposição em aterros sanitários.

Uma das vantagens do aterro sanitário em relação aos outros métodos de disposição, é que o aterro deve ser executado de forma que não comprometa a qualidade dos solos e das águas superficiais. Portanto, deve conter, por exemplo, impermeabilização de base (*liner* de fundo). Uma configuração de sistema de impermeabilização muito utilizada em aterros sanitários é a combinação de solos e geomembranas. Nesses casos, é muito importante conhecer a interação entre esses materiais. Normalmente, o colapso dessa estrutura ocorre pelo deslizamento do solo sobre a geomembrana. Devido à importância ambiental dessas obras, é importante estudar a resistência ao cisalhamento de interface entre a geomembrana e solos, a fim de garantir a estabilidade do sistema. Para isso, é necessário realizar ensaios de laboratório específicos, como o cisalhamento direto.

O uso de geomembranas em obras de Engenharia, como aterros sanitários, tem crescido nos últimos anos. O emprego desse material na camada de impermeabilização de base tem como objetivo diminuir a percolação de lixiviado para o solo natural, diminuindo o risco de contaminação de solos e águas naturais. Para melhorar o uso de geomembranas existem diversas pesquisas no Brasil e no exterior que tratam sobre o tema. Uma das linhas de pesquisa com esse material é a de resistência de interface com alguns materiais de construção civil. Essa análise é importante para obter dados sobre a estabilidade dos elementos que compõe a estrutura. Para isso, podem ser determinados em laboratório os ângulos de atrito das interfaces dos materiais. A literatura apresenta vários estudos sobre o tema, utilizando diversos equipamentos e métodos para estudar os mecanismos que atuam no

cisalhamento das interfaces. Um dos ensaios mais utilizados é o de cisalhamento direto.

Nesse trabalho foram realizados estudos com uso de duas granulometrias de uma areia e duas geomembranas, sendo uma lisa e uma texturizada. O ensaio realizado foi o de cisalhamento direto. A caixa de cisalhamento utilizada foi de 100x100 mm. A partir dos resultados foram realizadas comparações e análises sobre as resistências de interface das areias utilizadas com as geomembranas. O estudo pode ser descrito como uma comparação dos resultados de ângulo de interface de seis interfaces diferentes. Analisou-se as resistências da combinação de duas granulometrias de areia com geomembrana lisa e texturizada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar a resistência ao cisalhamento direto de seis interfaces diferentes, utilizando duas granulometrias de areia e duas geomembranas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Extrair informações características de duas frações de areia;
- II. Obter para a condição inundada os parâmetros de resistência ao cisalhamento das duas granulometrias de areia e das interfaces entre areia e geomembrana lisa e entre areia e geomembrana texturizada;
- III. Avaliar a influência da granulometria do material arenoso e da textura da geomembrana na resistência ao cisalhamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

Face à crescente utilização de geomembranas em aterros sanitários na impermeabilização de base e a utilização de areia como material inerte cuja função é proteger os materiais do sistema de impermeabilização contra a ruptura, torna-se significativo estudar os parâmetros de interface entre esses materiais. É importante

entender como ocorre a interação desses materiais para garantir a estabilidade dos taludes do aterro sanitário, por exemplo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Primeiramente são apresentados alguns conceitos importantes para o entendimento do trabalho. É apresentado o funcionamento de um aterro sanitário, com ênfase na impermeabilização da base. Após isso, é apresentado o sistema de impermeabilização através de *liners*, que podem ser compostos por um material como argila compactada e geomembranas. O próximo tópico trata sobre geomembranas, com algumas definições e os principais tipos. Ainda, são apresentados alguns dados sobre as interfaces estudadas. Por fim, são apresentados o ensaio de cisalhamento direto e o comportamento típico dos materiais nesse ensaio.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para a realização dessa pesquisa. Primeiramente é apresentado o planejamento, depois os materiais utilizados e por fim os métodos laboratoriais realizados.

Os resultados e análises são apresentados no capítulo 4. Primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da areia. Posteriormente são apresentados os resultados das interfaces analisadas, seguidas da análise dos valores encontrados.

O último capítulo apresenta as conclusões obtidas com base nos resultados alcançados nos ensaios das diferentes interfaces estudadas. As sugestões para trabalhos futuros também estão abordadas nesse item.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo dar embasamento teórico para os temas estudados nesse trabalho. Serão abordados primeiramente conceitos sobre o funcionamento de um aterro sanitário, com ênfase na impermeabilização de fundo. Em seguida, serão descritos alguns conceitos sobre *liners* e geomembranas. Além disso, serão sintetizadas algumas informações sobre as interfaces estudadas e o ensaio de cisalhamento direto. Por último serão descritos os comportamentos típicos dos materiais no ensaio de cisalhamento direto.

2.1 ATERRO SANITÁRIO

A norma NBR 8419 (ABNT, 1992, p.1), define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como

técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar dano à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Os aterros sanitários possuem três etapas operacionais, que estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Esquema do funcionamento de um aterro sanitário



Fonte: Andrade (2018).

Segundo Meneses, Sousa e Fernandes (2008) a primeira etapa é a de preparação, em que se executa os serviços de impermeabilização de fundo e a construção de redes de drenagem do chorume e gases residuais para a disposição final de resíduos sólidos. A segunda etapa é a de execução e compreende as atividades de manejo dos resíduos sólidos. Além disso, nessa etapa são executadas medidas de construção e manutenção na rede de drenagem de águas pluviais provisórias. A terceira etapa é a de conclusão, que consiste no fechamento das células que atingiram a sua capacidade máxima. Ainda, ocorre a execução de “coroamento” nos drenos de gases e a execução das redes finais de drenagem de águas da chuva.

Conforme supracitado, na etapa de preparação ocorrem os serviços de impermeabilização das células de contenção de resíduos sólidos. Ainda segundo Meneses, Sousa e Fernandes (2008), a impermeabilização das células é essencial para diminuir os riscos de poluição do lençol freático pela lixiviação ou percolação do chorume. Essa impermeabilização pode ser realizada com membrana sintética (Manta de Polietileno de Alta Densidade – PEAD). De acordo com Meneses, Sousa e Fernandes (2008, p.45) “As camadas de impermeabilização (PEAD e/ou argila compactada) devem receber uma camada de material inerte (ex.: areia) capaz de garantir a proteção mecânica contra ruptura destas camadas impermeabilizantes.”

Segundo a norma NBR 13.896 (ABNT, 1997), quando as condições hidrogeológicas do local escolhido para implantar um aterro sanitário não atenderem

às especificações, deve ser implantada uma camada impermeabilizante inferior. Essa camada deve ser construída com materiais com propriedades químicas compatíveis com os resíduos, cobrir toda a área e não deve oferecer riscos de ruptura.

2.2 LINERS

Uma das formas de realizar a impermeabilização das células de um aterro sanitário é através da construção de *liners*. Boff (1999, p. 1) ressalta que “os aterros sanitários devem grande parte do seu desempenho à eficiência de barreiras protetoras (*liners*). Conforme o mesmo autor, o termo *liner* é usado para definir camadas isolantes formadas por materiais naturais, artificiais ou a combinação de ambos.

De acordo com Lukiantchuki (2007) *liners* são barreiras impermeabilizantes, formadas por camadas de um determinado material e são utilizadas para diminuir a infiltração de água superficial nos resíduos, minimizando a geração de percolados (*liners* de cobertura) ou reduzindo o fluxo de percolados para o ambiente hidrogeológicos (*liners* de fundo).

Segundo Carvalho (1999, p.47) “Os *liners* são dispositivos utilizados quando se deseja reter ao máximo possível a percolação de um líquido, de forma que ele não atinja as águas e solo natural.” Ainda, conforme a autora

Existem vários tipos de *liners*, dentre eles destacam-se os naturais, os de argila compactada, as geomembranas e, ainda, uma mistura de todos esses elementos. A escolha de um ou de outro tipo é influenciada pelo uso a que se destina, pelo ambiente físico, pela química do percolado e pela taxa de infiltração. (CARVALHO, 1999, p.47).

Os *liners* naturais compreendem as formações naturais de solos ricos em argila e de baixa condutividade hidráulica, na faixa de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s. Os resíduos podem ser enterrados acima ou dentro de um *liner* natural. (DANIEL, 1993).

Segundo Bonaparte, Daniel e Koerner (2002), *liners* de argila compactada são construídos principalmente a partir de materiais naturais do solo que são ricos em argila natural, embora possa conter argila natural processada, como bentonita. De acordo com Lodi, Zornberg e Bueno (2009, p. 190) “Apesar da eficiência dos *liners* de argila compactada e de sua resistência adequada em longo prazo, estes podem apresentar contração das camadas argilosas, resultando em trincas e, conseqüentemente, diminuição de sua eficiência.”

Segundo Lodi, Zornberg e Bueno (2009) em virtude disso, os sistemas de impermeabilização de aterros sanitários têm sido construídos combinando materiais sintéticos a solos naturais, procurando diminuir a percolação dos líquidos e gases oriundos do aterro, impedindo que estes atinjam o solo e águas subterrâneas. Esses *liners* podem ser executados com geomembrana intercalada em camadas de argila compactada, formando estruturas compostas, em que cada camada tem sua finalidade (drenagem, proteção e impermeabilização).

2.3 GEOMEMBRANAS

De acordo com Rebelo (2003) geomembranas são materiais poliméricos, de baixa condutividade hidráulica e de pequena espessura utilizadas no revestimento ou cobertura de depósitos de resíduos sólidos. Tem como função principal prover uma camada impermeável para controlar a percolação de líquidos.

Segundo a norma NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2021) geomembrana é uma “estrutura constituída de materiais geossintéticos, produzida industrialmente em forma de lâmina, na qual a função barreira é essencialmente desempenhada por polímeros”.

As geomembranas são tipicamente utilizadas em aterros sanitários na impermeabilização da base e na cobertura. Uma das vantagens de utilizar esse material é a redução da espessura das barreiras impermeabilizantes de fundo nos aterros. (LODI, 2003).

Segundo Costa et al (2008), atualmente as geomembranas são extensamente utilizadas em várias obras ambientais, como aterros sanitários e industriais, canais, barragens, entre outras. A função desse material é proteger o solo e os aquíferos de contaminações. A Figura 2 apresenta algumas aplicações das geomembranas.

Figura 2 - Diversas aplicações das geomembranas



Fonte: Lodi (2003).

De acordo com Lavoie e Coelho (2018) hoje em dia vários tipos de geomembranas estão disponíveis no mercado, fabricadas com diferentes materiais e diferentes aditivos. Os principais tipos disponíveis são: Geomembranas de polietileno (PE), em que se destacam as geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), que podem ser lisas ou texturizadas; Geomembranas de policloreto de vinila (PVC); Geomembrana de borracha de propileno etileno (EPDM); Geomembrana de polipropileno (PP); Geomembrana de polietileno clorado (CPE) e Geomembrana composta.

2.4 ESTABILIDADE DE ATERROS SANITÁRIOS

De acordo com Rebelo (2003), o sistema de barreiras impermeáveis utilizados em aterros podem ser inclinados, como ocorre quando se deseja proteger um talude. Por isso, o uso dessas barreiras requer uma maior atenção para a análise de estabilidade, uma vez que há a presença de interfaces que podem apresentar baixa resistência ao cisalhamento e atuar como uma superfície de ruptura ou deslizamento.

A estabilidade de aterros sanitários é verificada de modo similar a problemas geotécnicos tradicionais de taludes, sendo que a ruptura pode ocorrer no solo de fundação, na massa de resíduos sólidos urbanos, na cobertura do aterro ou em interfaces (resíduo/solo; resíduo/geomembrana; geomembrana/solo). (Strauss, 1998).

Os principais fatores que norteiam a análise de estabilidade em aterros sanitários de acordo com Strauss (1998, p. 38):

1. propriedades do solo de fundação;
2. resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU;
3. geometria do talude;
4. nível do lixiviado e seu padrão de fluxo dentro do aterro;
5. tipo de cobertura;
6. resistência da cobertura à erosão.

Além disso, no caso de rupturas em interfaces, como geomembrana-solo, a resistência ao cisalhamento ao longo da interface também é um fator importante. (Strauss, 1998).

Segundo Costa Junior (2020), existem casos relatados de ruptura de aterros sanitários devido à baixa resistência de interface entre a geomembrana e o material subjacente. Um caso muito estudado é o do aterro de Kettleman Hills, que rompeu em 1998 por conta da baixa resistência ao cisalhamento de interface entre os materiais, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Ruptura do aterro de Kettleman Hills.



Fonte: Wingler e Vilar (2005).

2.5 INTERFACES ESTUDADAS

Monteiro (2012) em seu estudo sobre interface solo-geomembrana com variações de níveis de saturação do solo, utilizou areia fina e três geomembranas, uma geomembrana lisa de policloreto de vinila e duas geomembranas de polietileno de alta densidade (uma lisa e uma texturizada). Para obter os parâmetros de cisalhamento de interface, a autora realizou ensaios de plano inclinado e cisalhamento direto. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo entre parâmetros de resistência obtidos via ensaios de plano inclinado e ensaios de cisalhamento direto.

Interface	S_r (%)	Parâmetros de resistência				$\Delta\phi_{sg}$
		Plano inclinado		Cisalhamento direto		
		ϕ_{sg}	a	ϕ_{sg}	a	
GM PVC L/Areia	S1 (5,5)	29	0	30	0	1
	S2 (10,8)	30	0	30	0	0
	S3 (15,7)	30	0	31	0	1
	S4 (20,3)	30	0	32	0	2
	S5 (26,3)	31	0	33	0	2
	S6 (45,1)	31	0	33	0	2
	S7 (58,4)	30	0	33	0	3
	S8 (66)	34	0	39	0	5
GM PEAD L/Areia	S1 (5,5)	26	0	27	0	1
	S2 (10,8)	28	0	29	0	1
	S3 (15,7)	27	0	27	0	0
	S4 (20,3)	29	0	32	0	3
	S5 (26,3)	29	0	31	0	2
	S6 (45,1)	30	0	31	0	1
	S7 (58,4)	27	0	29	0	2
	S8 (66)	27	0	31	0	4

ϕ_{sg} : Ângulo de atrito; a: adesão.

Fonte: Adaptado de Monteiro (2012).

Alves (2012) em seu estudo experimental do atrito da interface areia-geomembrana, utilizou dois solos arenosos (areia média de construção civil e areia proveniente de Osório) e duas geomembranas uma lisa e uma texturizada. O ensaio realizado foi o de cisalhamento direto. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Ângulos de atrito de interfaces 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°

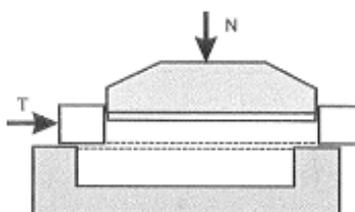
Fonte: Adaptado de Alves (2012).

2.6 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Segundo Pinto (2006) o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo método para determinar a resistência ao cisalhamento. Esse procedimento se baseia no critério de Coulomb. Uma tensão normal é aplicada em um plano e verifica-se a tensão cisalhante que causa a ruptura.

De acordo com o mesmo autor, para o ensaio, um corpo de prova é acomodado em uma caixa de cisalhamento. É aplicada uma força vertical N . Uma força tangencial T é aplicada na parte superior da caixa, provocando seu deslocamento, ou um deslocamento é gerado, medindo-se a força resistida pelo solo (Figura 4). As forças T e N divididas pela área da seção transversal do corpo de prova indicam as tensões normais (σ) e cisalhantes (τ) que estão ocorrendo.

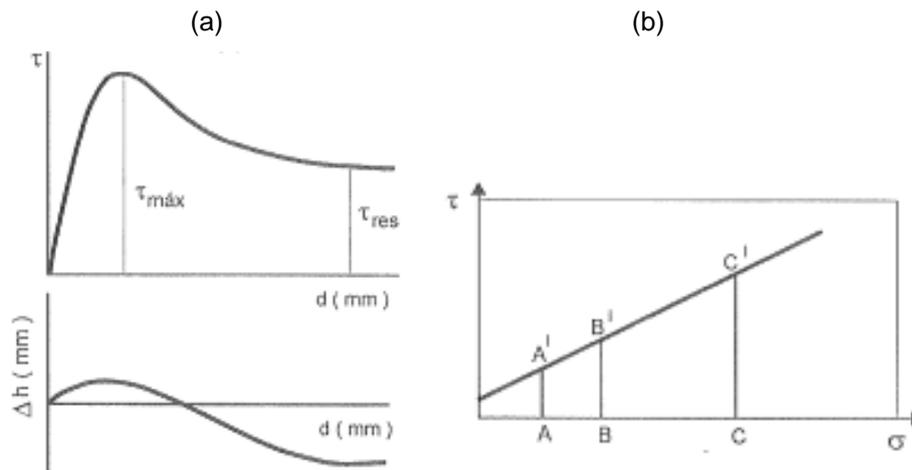
Figura 4 - Esquema do equipamento de cisalhamento direto



Fonte: Pinto (2006).

A Figura 5 (a) mostra a tensão τ representada em função do deslocamento no sentido do cisalhamento. Pode ser identificado a tensão de ruptura (máxima) e a tensão residual. A variação volumétrica durante o ensaio também é registrada, indicando se houve aumento ou diminuição do volume durante o cisalhamento (Figura 5 (a)). Realizando o ensaio com diferentes tensões obtém-se a envoltória de resistências, conforme Figura 5 (b). (Pinto,2006).

Figura 5 - (a) Representação de resultado típico de ensaio; (b) Envoltória de resistências

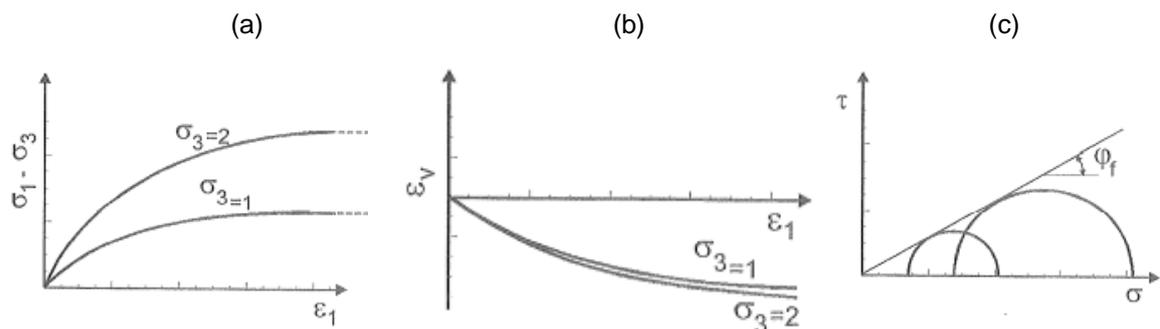


Fonte: Pinto (2006).

2.7 COMPORTAMENTO TÍPICO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

De acordo com Pinto (2006) a análise da resistência ao cisalhamento das areias pode ser realizada para dois casos: areia fofa e areia compactas. Na primeira situação o material assume gráficos parecidos aos apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Gráficos de cisalhamento para areias fofas: (a) curva tensão-deformação; (b) variação volumétrica; (c) curva tensão normal x tensão cisalhante.

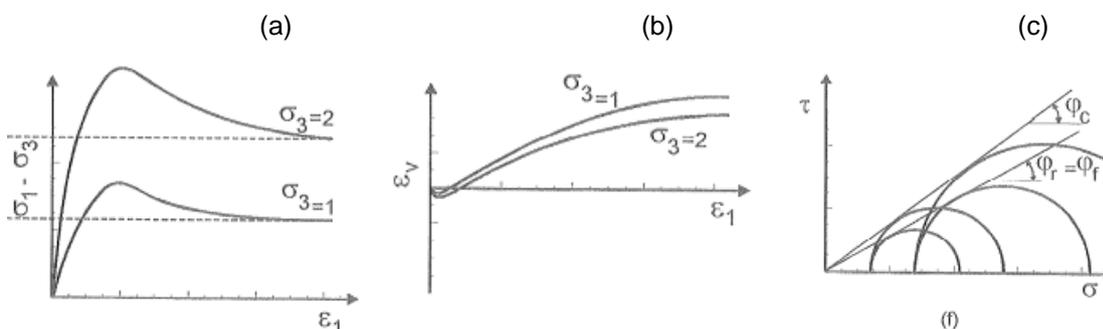


Fonte: Pinto (2006).

Em concordância com a Figura 6 (a), Salmaso (2017) afirma que no caso de areias fofas não há um pico de tensão definido, de forma que a tensão mobilizada aumenta até atingir um patamar que se mantém constante apesar da deformação. Para a Figura 6 (b), Pinto (2006) afirma que as medidas de variação volumétrica durante o carregamento indicam diminuição de volume, sendo que para pressões confinantes maiores, as reduções são um pouco maiores. Ainda conforme Pinto (2006), a Figura 6 (c) apresenta que ao se traçar os círculos de Mohr correspondentes às máximas tensões, obtêm-se círculos cuja envoltória é uma reta que passa pela origem, portanto a resistência da areia fica definida pelo ângulo de atrito interno efetivo.

Já quando a areia se encontra no estado compacto, assume gráficos similares aos apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Gráficos de cisalhamento para areias compactas: (a) curva tensão-deformação; (b) variação volumétrica; (c) curva tensão normal x tensão cisalhante.



Fonte: Pinto (2006).

Para a curva tensão-deformação de areias compactas (Figura 7 (a)), de acordo com Pinto (2006) a tensão cresce mais rápido com as deformações, até atingir um valor máximo, sendo esse valor considerado a resistência máxima ou resistência de pico. Atingida essa resistência máxima, ao continuar a deformação do corpo de prova, a tensão decresce lentamente até se estabilizar em torno de um valor que é considerado como resistência residual. Com relação à variação volumétrica (Figura 7 (b)), observa-se que inicialmente se apresenta uma redução de volume, mas ainda antes de atingir a resistência máxima, o volume do corpo de prova começa a crescer, sendo que na ruptura o corpo de prova apresenta maior volume que no início do carregamento. Com relação a Figura 7 (c), Pinto afirma que os círculos do estado de tensão máxima definem a envoltória de resistência. A envoltória é uma reta que passa

pela origem e a resistência de pico das areias compactas é expressa pelo ângulo de atrito interno.

Para interfaces solo x geomembrana, Rebelo (2003), em seu estudo sobre resistência de interface entre geomembranas e solos, afirma que em interfaces envolvendo materiais granulares, a rugosidade de geomembrana contribui significativamente para o aumento da resistência. A partir dos resultados, a autora verificou um acréscimo de aproximadamente 50% no ângulo de atrito de pico nas geomembranas PEAD-texturizadas em relação às de PEAD-lisa.

Além disso, Sanchez (2018) afirma que em interfaces com geomembrana lisa a tensão de pico é aproximadamente igual a tensão pós-pico e o deslocamento horizontal é maior para maior tensão normal. As conclusões obtidas pelo autor mostram que o ângulo de atrito para interfaces com geomembrana texturizada são maiores do que para interfaces com geomembranas lisas.

Monteiro (2012) avaliou interfaces solo - geomembrana com variações de níveis de saturação do solo, a partir de seus resultados concluiu que os menores ângulos de atrito observados foram para interfaces com geomembranas lisas. Interfaces com geomembrana PEAD texturizada apresentaram valores maiores de ângulo de atrito. A autora afirma que as geomembranas texturizadas fornecem condições de rugosidade que promovem um melhor nível de adesão de interface, repercutindo em comportamentos melhores quando à mobilização da resistência ao cisalhamento.

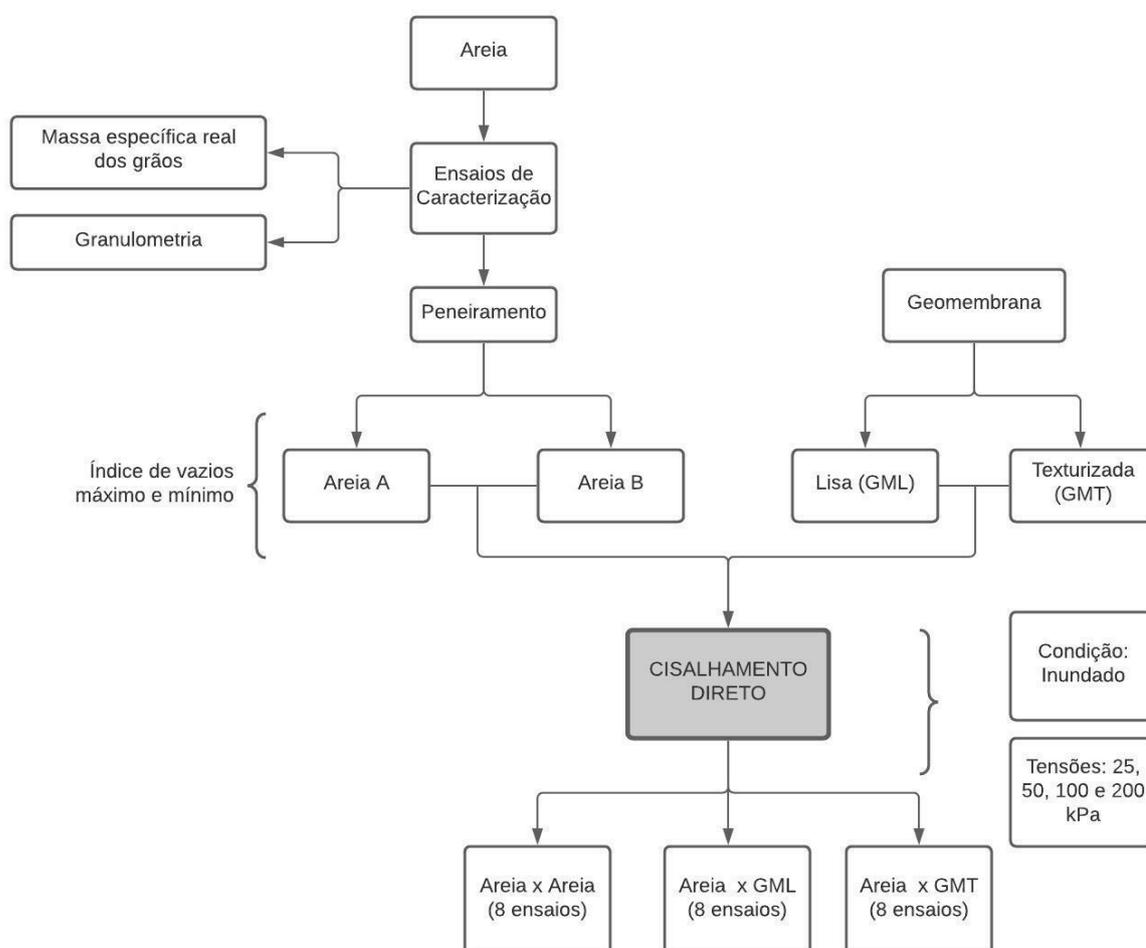
3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda informações sobre o planejamento da pesquisa, definição dos materiais utilizados e os métodos, que engloba a etapa de laboratório, com os ensaios realizados e as análises que serão realizadas nesse trabalho.

3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A organização da pesquisa é esquematizada através do fluxograma apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autora

A metodologia fundamentou-se em três etapas principais, em que foram desenvolvidas as seguintes atividades:

(a) Definição do material de estudo: após a escolha do tema do estudo, definiu-se o material a ser estudado. Foi escolhido uma areia e geomembrana lisa e texturizada.

(b) Etapa de laboratório: foram realizados ensaios de caracterização física da areia, com os ensaios de massa específica, granulometria e índice de vazios máximo e mínimo. Após isso, separou-se o material em duas granulometrias através de peneiramento manual. Por fim, foi realizado ensaios de cisalhamento direto de diferentes interfaces, utilizando as geomembranas estudadas.

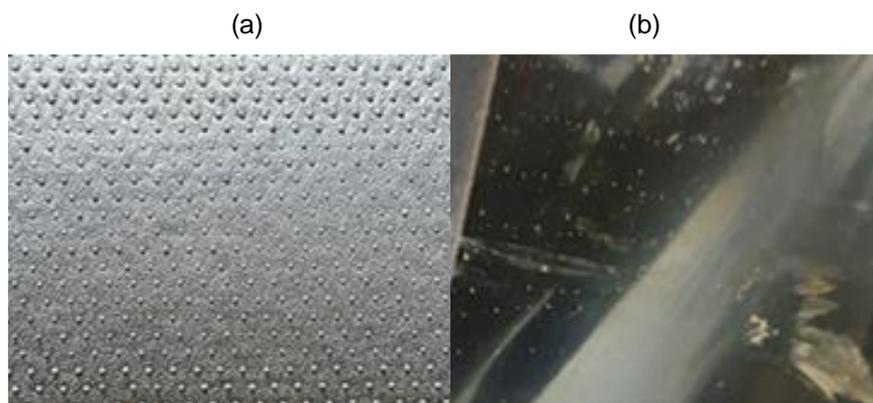
(c) Comparação entre as interfaces estudadas: os resultados obtidos em laboratório foram reunidos e comparados. Avaliou-se as influências da textura da geomembrana e da granulometria da areia.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

O material escolhido para a realização desse estudo foi uma amostra de areia, que posteriormente foi separada em duas granulometrias. A areia utilizada nessa pesquisa estava disponível para estudo no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). As duas granulometrias estudadas foram obtidas a partir do peneiramento desse material. Dessa forma, nessa pesquisa será estudada a influência da diferença de granulometria do material, excluindo comparações quanto à mineralogia.

Nessa pesquisa, foram utilizadas duas geomembranas, a primeira é de Polietileno de baixa densidade (PEBD) e é lisa e a segunda é de polietileno de alta densidade (PEAD) e é texturizada. Na Figura 9 são apresentadas as geomembranas utilizadas, (a) geomembrana texturizada e (b) geomembrana lisa.

Figura 9 – Geomembranas utilizadas: (a) geomembrana texturizada; (b) geomembrana lisa.



Fonte: Chiarello (2022).

A caracterização física e mecânica das geomembranas utilizadas nessa pesquisa foi previamente realizada e os resultados obtidos estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades das geomembranas.

Propriedade	Texturizada	Lisa
Espessura (mm)	1,95	1
Densidade (g/cm ³)	0,949	0,938
Altura da aspereza (mm)	0,82	0
Tensão na ruptura (kN/m)	60,8	-

Fonte: Adaptado de Chiarello (2022).

Foram escolhidas dois tipos de geomembranas para comparar a influência da textura do material utilizado nos sistemas de impermeabilização.

Para a preparação dos corpos de prova da interface areia x geomembrana, foi utilizado um pedaço de madeira cortado do tamanho da caixa bipartida inferior, uma lixa P100, geomembranas lisa e texturizada cortadas no tamanho da caixa inferior e colas.

3.3. MÉTODOS

3.3.1 Massa específica

A preparação da areia para os ensaios de caracterização seguiu as recomendações da norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Foi utilizado essa norma porque nesse estudo a areia foi tratada como solo.

A areia passou por um processo de secagem ao ar até atingir umidade próxima à higroscópica. Após a secagem o material foi homogeneizado.

O ensaio de massa específica seguiu os preceitos da norma NM 52 (ABNT, 2009). A Figura 10 apresenta as etapas realizadas para esse ensaio: (a) o material coberto com água em repouso por 24 h, (b) a amostra estendida em uma superfície plana para secar ao ar, (c) a amostra sendo revolvida com frequência para secar uniformemente e (d) o material desmoronando parcialmente.

Figura 10 – Preparação da amostra para o ensaio de massa específica: (a) material coberto com água; (b) amostra secando ao ar; (c) amostra sendo revolvida; (d) amostra parcialmente desmoronada



Fonte: Autora

Com a amostra preparada, seguiu-se com o procedimento descrito na norma. Primeiramente, foram pesados 500 g de material, colocado em um frasco e pesado o conjunto. O frasco foi enchido com água destilada até a marca de 500 ml (Figura 11). Após 1 h foi completado com água até a marca de 500 cm³ e determinado a massa total. Por último o agregado foi retirado do frasco e secou-se até massa constante. Esfriou-se à temperatura ambiente e pesou-se.

Figura 11 - Areia e água destilada em repouso para o ensaio de massa específica



Fonte: Autora

Esse ensaio tem como objetivo a determinação da massa específica e da massa específica aparente dos agregados miúdos. Os resultados obtidos encontram-se no item 4.1.

3.3.2 Granulometria

Com o material preparado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016), foi realizada a análise granulométrica da amostra conforme a NBR 7181 (ABNT, 2018).

O ensaio de granulometria foi realizado através de peneiramento manual, para isso foi utilizado as peneiras de abertura 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

Com o auxílio do *Software Microsoft Excel* foi possível obter a curva granulométrica do material. Em posse disso, escolheu-se dividir a areia em duas frações: a primeira corresponde ao material passante na peneira de abertura 1,2 mm

e retido na peneira de abertura 0,42 mm e foi chamada de Areia A; a segunda corresponde ao material passante na peneira de abertura 0,42 mm e foi denominada Areia B. A escolha para essa divisão baseou-se na curva granulométrica, de forma que fosse possível obter material suficiente para os ensaios realizados.

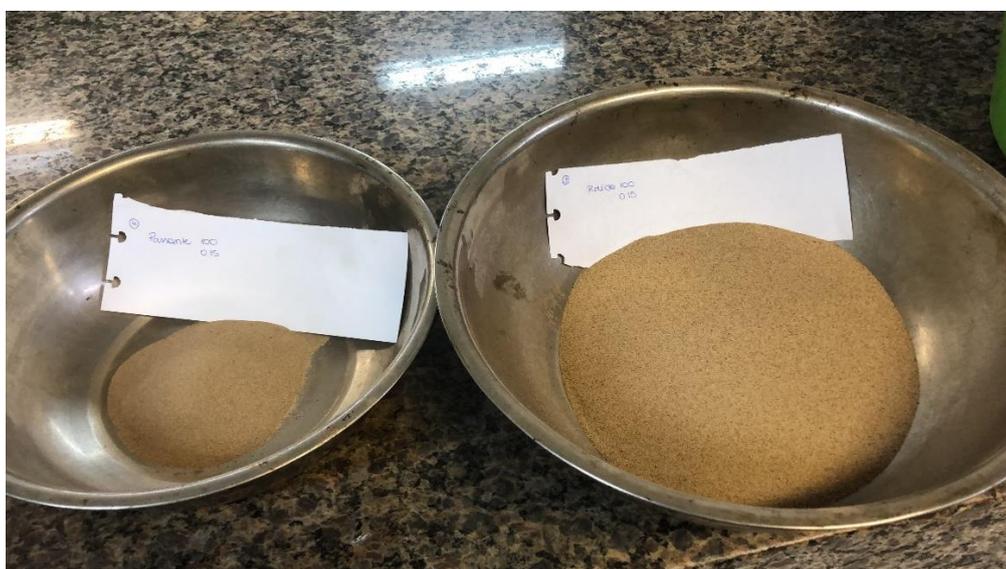
As Figuras 12 e 13 apresentam as frações granulométricas obtidas a partir do ensaio do peneiramento do material. A Figura 12 apresenta a esquerda o material retido na peneira de abertura 0,42 e a direita o material retido na peneira 1,2.

Figura 12 – Granulometria média e grossa peneirada



Fonte: Autora

Figura 13 – Granulometria fina peneirada



Fonte: Autora

3.3.3 Determinação do índice de vazios máximo e mínimo

A determinação do índice de vazios máximo e mínimo foi realizado para as duas granulometrias estudadas. Para a determinação do índice de vazios máximo foi seguido as recomendações da norma NBR 16840 (ABNT, 2020). O ensaio de determinação do índice de vazios mínimo foi realizado segundo a NBR 16843 (ABNT, 2020).

Para esse ensaio foi utilizado o cilindro de Proctor com volume de 1000 cm³, os materiais utilizados nessa etapa estão apresentados na Figura 14 (a) Cilindro de Proctor; (b) demais materiais. Ainda, a Figura 14 (c) mostra que para o ensaio de índice de vazios mínimo um peso de 4,126 kg foi aplicado para melhor compactar o corpo de prova.

Figura 14 – Materiais utilizados no ensaio de índice de vazios: (a) Cilindro de Proctor; (b) demais materiais; (c) peso aplicado nos corpos de prova.



Fonte: Autora

Na Figura 15 está apresentado a preparação do corpo de prova com o rasamento da areia e logo após na Figura 16 pode-se observar o corpo de prova pronto para ser pesado. Os resultados obtidos estão apresentados em 4.1.

Figura 15 - Preparação do cilindro de Proctor para ensaio



Fonte: Autora

Figura 16 - Cilindro de Proctor preparado para o ensaio



Fonte: Autora

3.3.4 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados em uma caixa metálica de 10 x 10 cm. A parte superior da caixa foi marcada com o auxílio de caneta permanente e paquímetro de forma que o corpo de prova ficasse com 2 cm de altura. Portanto, os corpos de prova ficaram com 10 x 10 x 2 cm (comprimento x largura x altura). Na Figura 17 é

possível observar um corpo de prova preparado para ensaio e no centro da caixa a marca vermelha realizada para controle da altura do corpo de prova.

Figura 17 - Corpo de prova preparado para ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autora

Os corpos de prova foram preparados em uma mesa vibratória (Figura 18). Primeiramente uma camada do material arenoso era adicionado na caixa, então acontecia a vibração dessa camada. Após vibrar a primeira camada, eram adicionadas mais duas camadas de areia, até atingir a marca de caneta realizada previamente.

Figura 18 – Mesa vibratória utilizada para preparação dos corpos de prova.



Fonte: Autora

Nas interfaces com geomembrana o procedimento realizado foi o mesmo, porém, por se tratar de cisalhamento direto com caixa fixa, a caixa inferior foi preenchida com um bloco de madeira onde foi fixado uma lixa e a geomembrana estudada foi fixada diretamente na lixa, com a finalidade de aumentar a área de contato entre caixa-geomembrana e a fixação do material.

As lixas foram coladas no bloco de madeira e tiveram tempo de secagem de 24 h, percebeu-se que quando ensaiado no mesmo dia a lixa descolava do bloco de madeira. As geomembranas foram coladas nas lixas e tiveram tempo de secagem menor, sendo ensaiadas no mesmo dia. Recomenda-se que a colagem da geomembrana na lixa tenha tempo de secagem similar à da colagem da lixa no bloco de madeira, devendo ter tempo de secagem próximo a 24 h.

Cada geomembrana foi utilizada em somente um ensaio porque percebeu-se que esse material era danificado pela areia durante o cisalhamento (Figura 19).

Figura 19 - Geomembrana danificada após ensaio



Fonte: Autora

A caixa bipartida foi pesada antes e depois de adicionar a amostra de material. Com isso foi possível controlar as condições dos corpos de prova ensaiado. Com relação ao índice de vazios, os corpos de prova foram preparados da mesma forma que no ensaio para obtenção dos parâmetros máximo e mínimo, utilizando a mesma mesa vibratória e forma de colocação do material na caixa.

3.3.5 Etapa de laboratório

O ensaio de cisalhamento direto realizado nesse estudo foi ensaio de cisalhamento de interfaces com caixa fixa, que não possui norma brasileira. A norma para tal ensaio é regulada pela American society for testing and materials ASTM D 5321. O equipamento utilizado para executar os ensaios foi uma prensa de cisalhamento direto produzida pela Ronald Top (Figura 20). A prensa possui uma caixa bipartida, durante o ensaio a parte superior desloca com a imposição da tensão cisalhante aplicada e a parte inferior permanece parada.

Figura 20 – Aparelho de cisalhamento direto.



Fonte: Autora

Os ensaios foram realizados para a pior condição de resistência, com a caixa de cisalhamento inundada. Essa condição é normalmente encontrada em aterros sanitários, pois a camada fica inundada com chorume. Para a execução do ensaio o corpo de prova era colocado no equipamento e sobre ele aplicava-se a tensão normal. Com a estabilização da deformação vertical a tensão cisalhante era aplicada, estabelecendo deslocamento horizontal à amostra.

As leituras de deslocamento vertical e a horizontal foram realizadas manualmente com a ajuda de extensômetros. A leitura da deformação horizontal foi realizada com o auxílio de um anel dinamométrico com capacidade de 50kgf.

As tensões estudadas foram 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Para isso, foi aplicado respectivamente um peso no pórtico igual a 1,75 kg, 6,75 kg, 16,75 kg e 36,75 kg. Todos os ensaios foram realizados na condição inundada. As interfaces estudadas foram: Areia A x Areia A/Geomembrana lisa/Geomembrana texturizada e Areia B x Areia B/Geomembrana lisa/Geomembrana texturizada. O tempo de ensaio foi de 30 min até a deformação horizontal de 10 mm, portanto foi realizado com uma velocidade de deslocamento de 0,33 mm/min. O ensaio foi realizado até a deformação horizontal de 17,50 mm. Essas informações estão sintetizadas na Tabela 4.

Foram utilizadas quatro tensões para obter com mais certeza a envoltória característica de cada interface. O tempo de ensaio realizado foi de 30 min por se tratar de uma areia.

Com os dados dos ensaios e o auxílio do Excel, foi possível determinar os gráficos de tensão cisalhante x deslocamento horizontal, variação volumétrica x deformação horizontal e tensão cisalhante x tensão vertical.

Tabela 4 - Número de ensaios realizados

Interface		Tensão normal aplicada	Número de ensaios na condição inundada
	Areia A		4
Areia A	Geomembrana lisa	25, 50, 100 e 200 (kPa)	4
	Geomembrana texturizada		4
Areia B	4		
Areia B	Geomembrana lisa		4
	Geomembrana texturizada	4	
Total de ensaios			24

Fonte: Autora

Na Figura 21 podem ser observados dois corpos de prova cisalhados (a) Interface areia x areia; (b) Interface areia x geomembrana.

Figura 21 - Corpos de prova cisalhados (a) Interface areia x areia: (b) Interface areia x geomembrana

(a)



(b)



Fonte: Autora

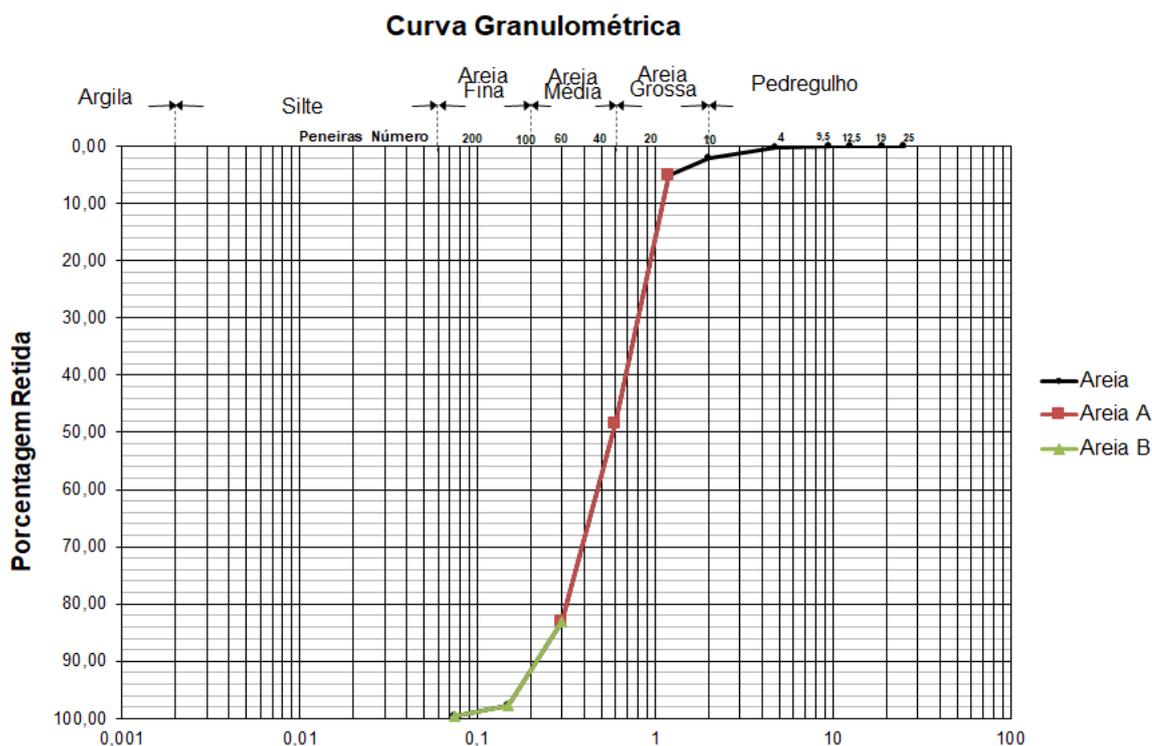
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na etapa de laboratório descritos na metodologia do Capítulo 3. Primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização. Posteriormente são exibidos os resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Por último é realizada a apresentação e análise dos resultados.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Nesse item são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização e as classificações realizadas para a areia estudada. A curva granulométrica do material, obtida por peneiramento, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016), é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Curva granulométrica da areia.



Fonte: Autora

A partir da curva granulométrica apresentada, foi analisado para cada fração de areia estudada o coeficiente de não conformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC). O coeficiente CNU indica o quão melhor graduada será a areia. Quanto maior o valor do CNU melhor graduado é o material. Para a areia A, o valor de CNU obtido foi de 0,5 e para a areia B, o valor de CNU obtido foi de 1. Esses valores indicam um material muito uniforme e quando se encontram abaixo de dois, são chamadas de areias uniformes (Pinto, 2006). Já o coeficiente CC permite identificar discontinuidades ou concentração elevada de um tipo ou tamanho de grão. Para a areia A, o valor de CC obtido foi de 1,28, para a areia B, o valor de CC obtido foi 1. Os valores obtidos indicam materiais bem graduados (Pinto, 2006). Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros da curva granulométrica

Parâmetros	Areia A	Areia B
CNU	0,50	1,00
CC	1,28	1,00

Fonte: Autora

Na Tabela 6, é apresentado o peso específico do material, obtido a partir do ensaio de massa específica. OA massa específica aparente do agregado seco encontrada foi 2,036 g/cm³, a massa específica do agregado saturado superfície seca encontrada foi 2,053 g/cm³ e a massa específica encontrada foi 2,072 g/cm³. O ensaio de massa específica foi realizado duas vezes, os resultados obtidos foram muito similares e o valor utilizado é uma média dos dois valores.

Além disso, a Tabela 6 apresenta as porcentagens de cada fração de material encontrado na granulometria da areia estudada.

Tabela 6 - Caracterização física da areia

Parâmetros	Areia
Peso específico (γ) kN/m ³	20,72
% pedregulho (>2,0mm)	2
% areia grossa (0,6 – 2,0mm)	46
% areia média (0,2 – 0,6mm)	45
% areia fina (0,06 – 0,2mm)	7
% silte (2 μ m – 0,06mm)	0
% argila (%< 2 μ m)	0

Fonte: Autora

Os ensaios realizados para a obtenção do índice de vazios máximo e mínimo foram realizados duas vezes para cada areia. Em cada ensaio é necessário preencher três vezes um molde de volume conhecido com o material. A partir da relação de peso e volume, relacionando com a massa específica do material, obtém-se o índice de vazios. Portanto, para cada areia e em cada condição de vazios foram realizados seis vezes o preenchimento do molde. Os valores obtidos foram muito similares nessas repetições e estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Índice de vazios máximo e mínimo das areias estudadas

Parâmetros	Areia A	Areia B
Índice de vazios máximo	0,40	0,46
Índice de vazios mínimo	0,26	0,22

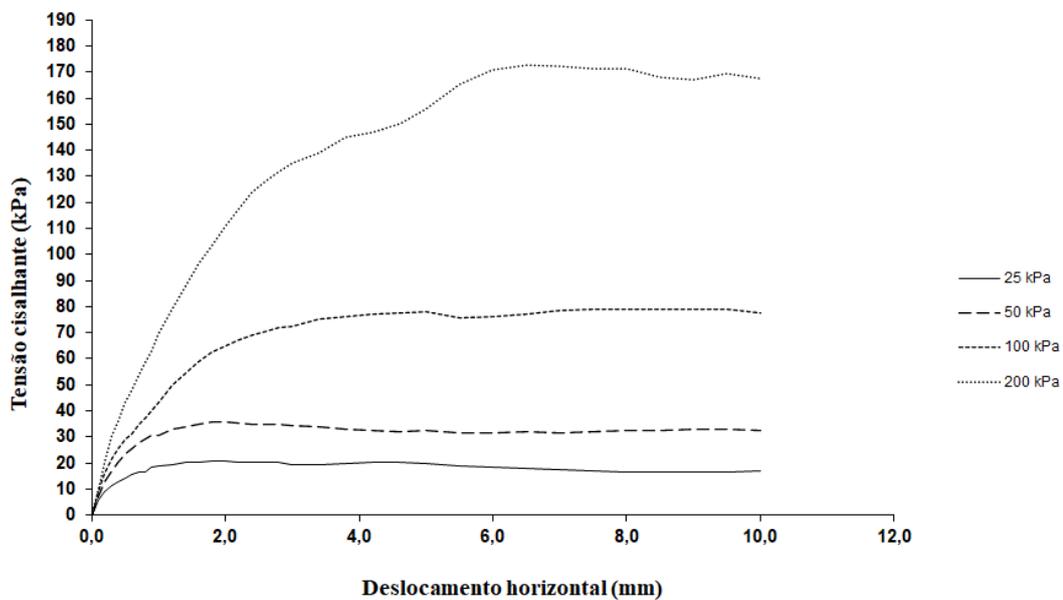
Fonte: Autora

4.2 CISALHAMENTO DIRETO

Os dados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto serão apresentados separadamente a partir da granulometria da areia estudada e de acordo com a interface. Primeiramente é apresentado os gráficos para a interface areia x areia, depois areia x geomembrana lisa e por fim areia x geomembrana texturizada.

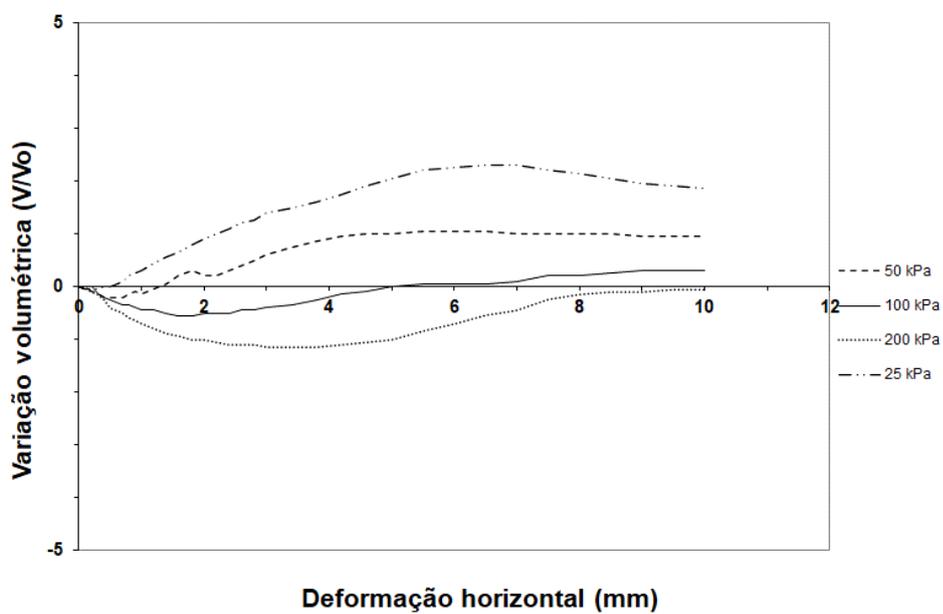
4.2.1 Areia A

Figura 23 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia A x areia A



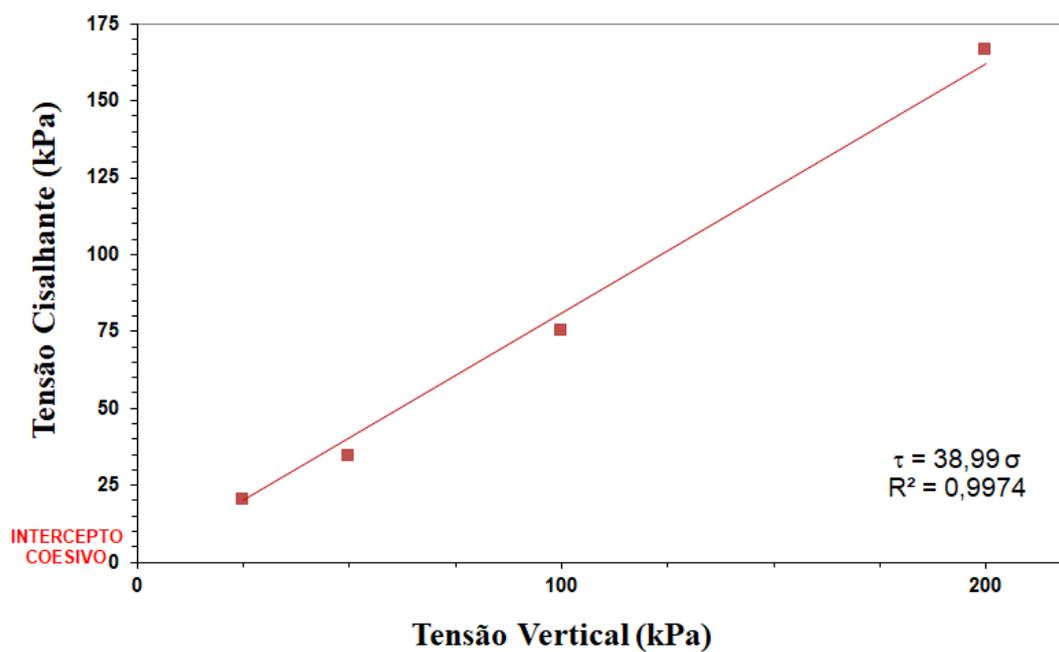
Fonte: Autora

Figura 24 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia A x areia A



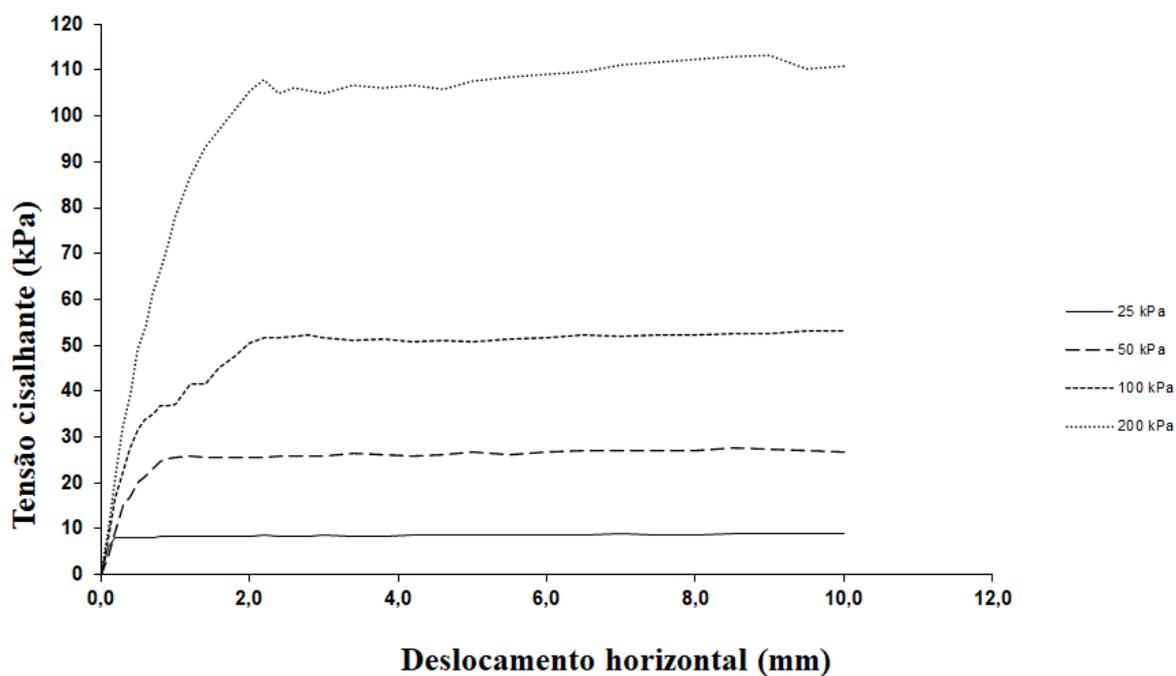
Fonte: Autora

Figura 25 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia A x areia A



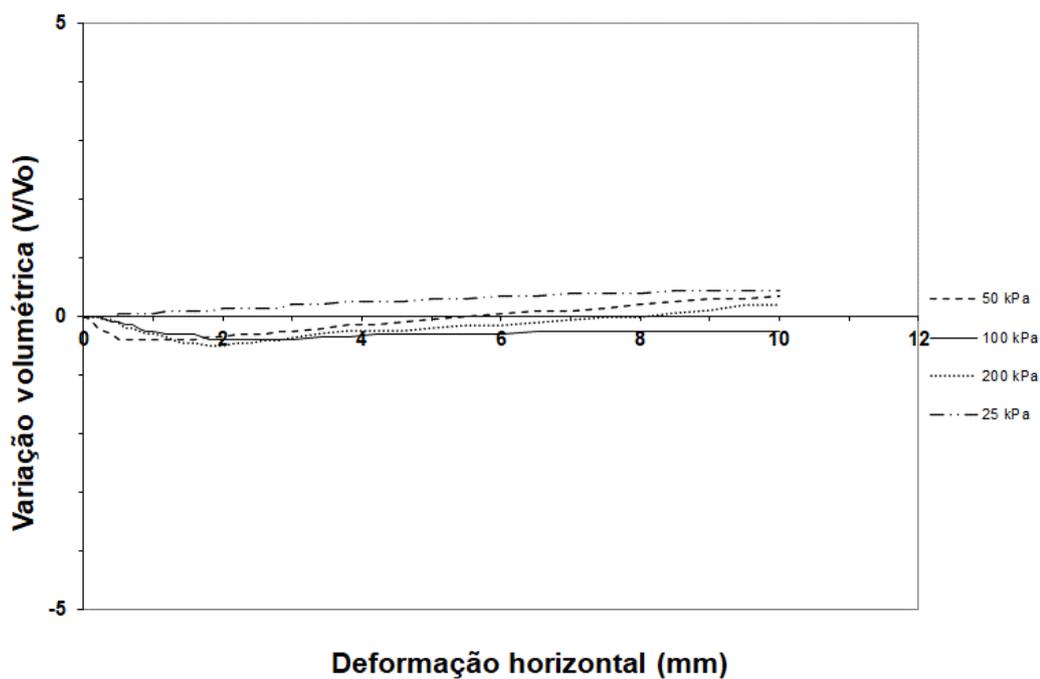
Fonte: Autora

Figura 26 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia A x Geomembrana lisa.



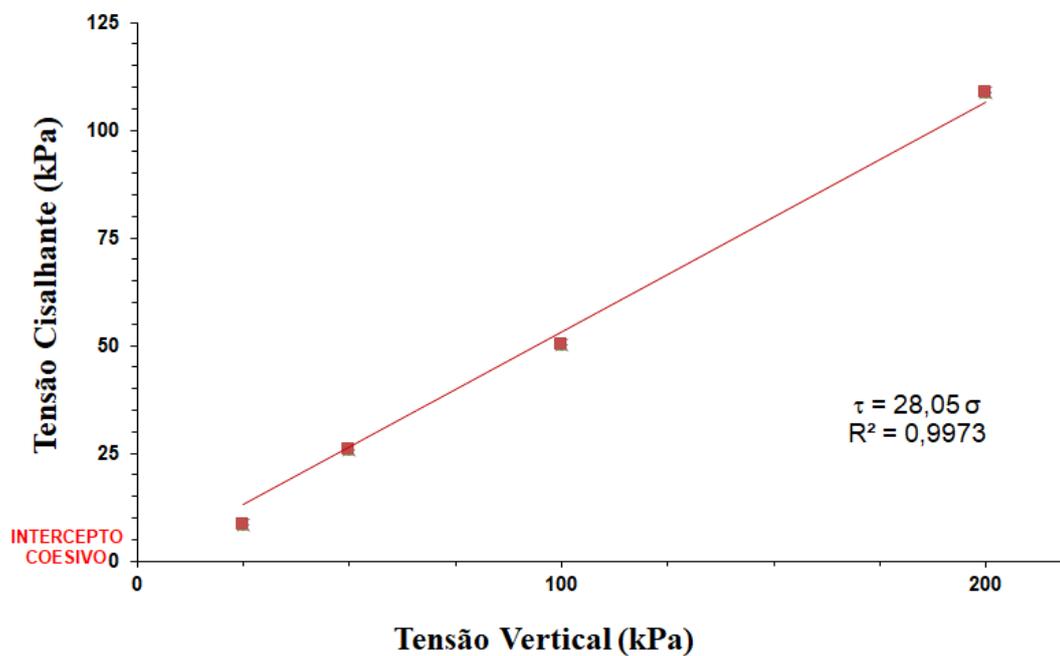
Fonte: Autora

Figura 27 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia A x Geomembrana lisa



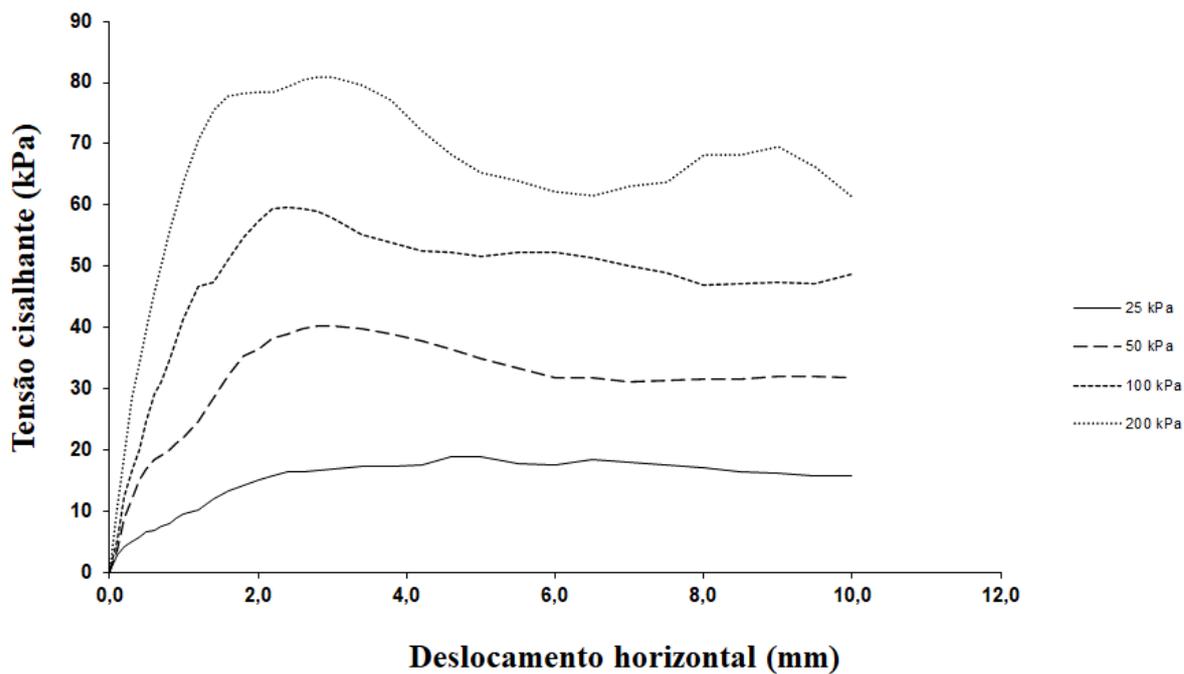
Fonte: Autora

Figura 28 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia A x Geomembrana lisa



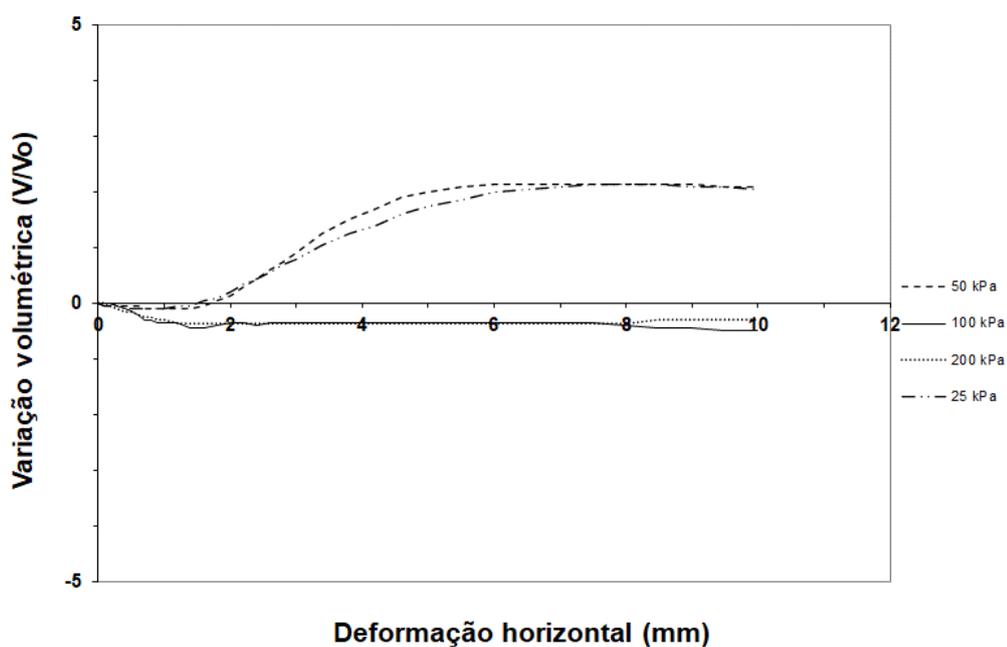
Fonte: Autora

Figura 29 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia A x Geomembrana texturizada



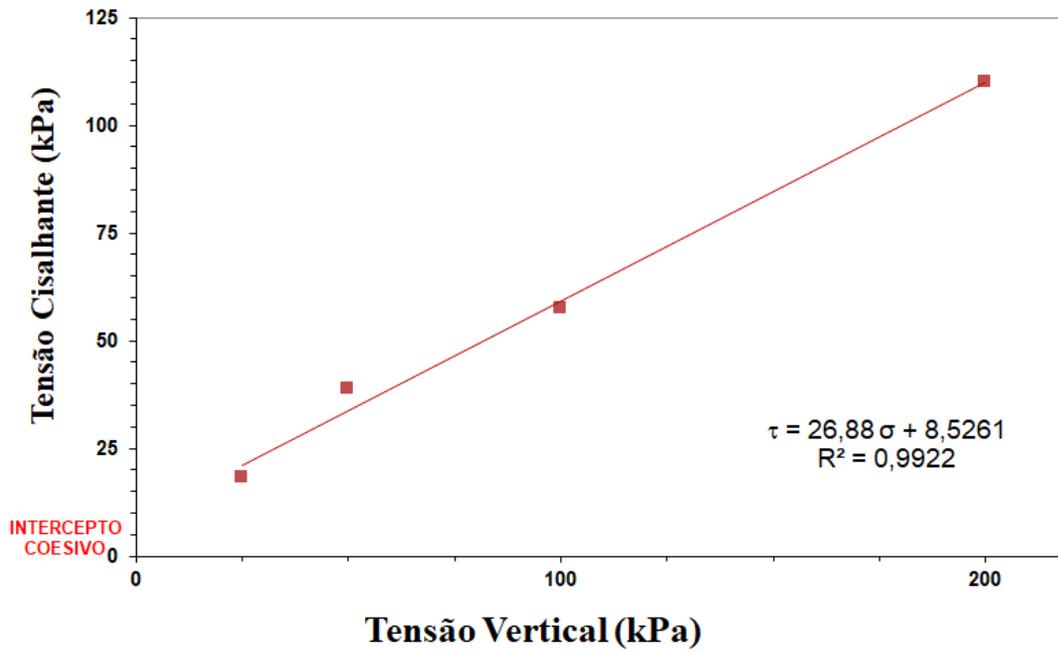
Fonte: Autora

Figura 30 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia A x Geomembrana texturizada



Fonte: Autora

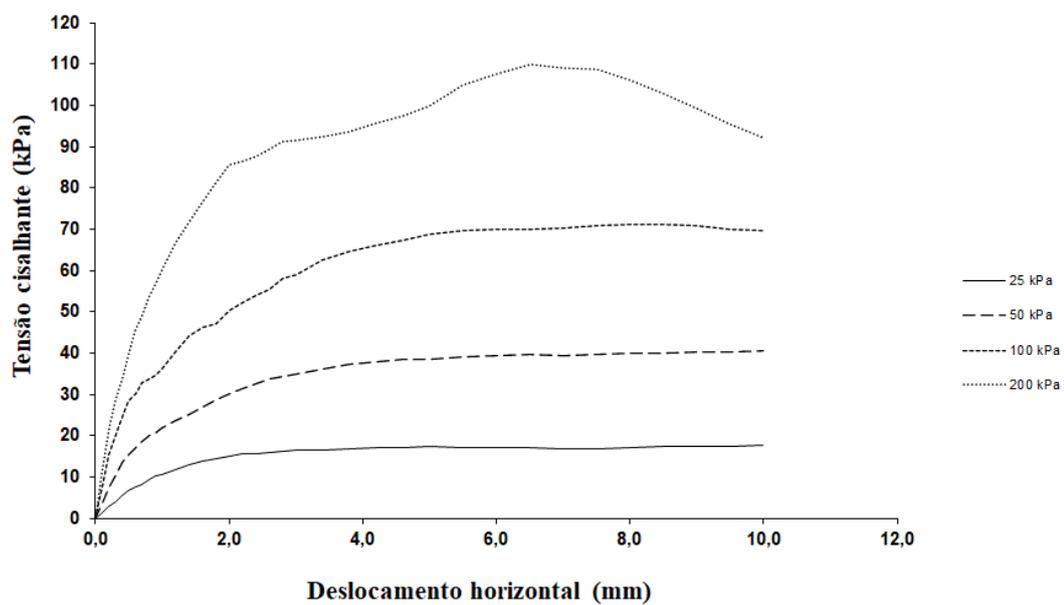
Figura 31 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia A x Geomembrana texturizada



Fonte: Autora

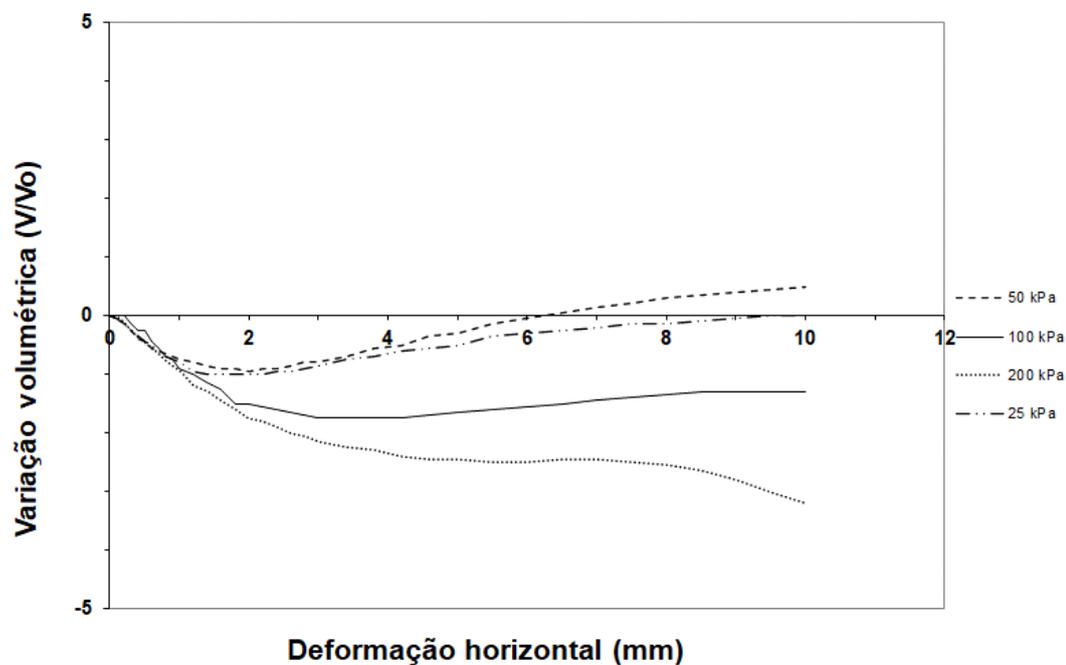
4.2.2 Areia B

Figura 32 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia B x areia B



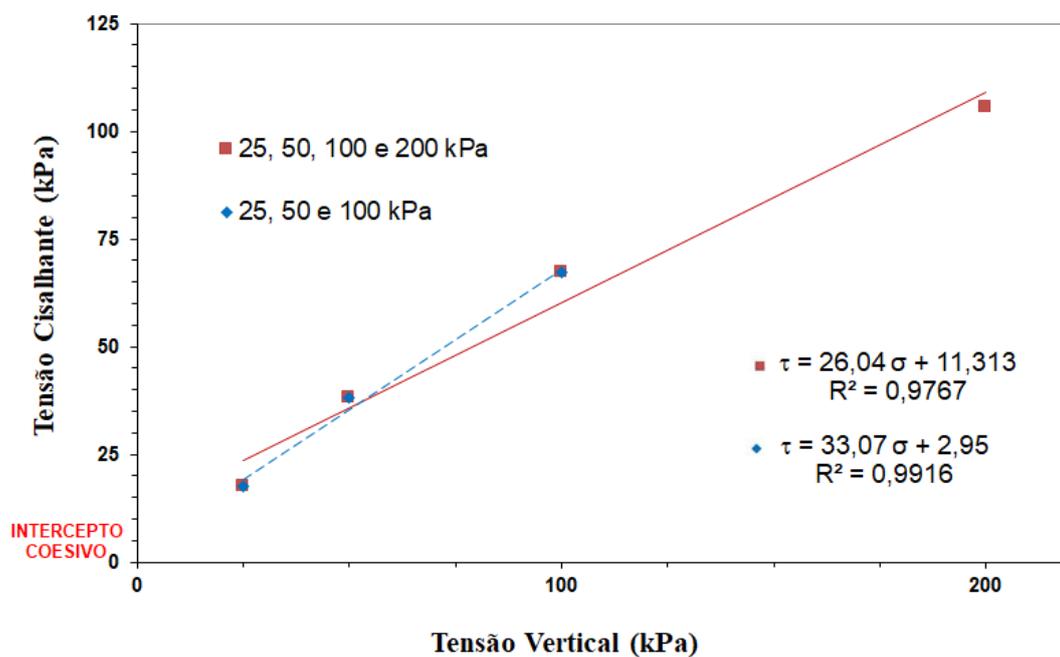
Fonte: Autora

Figura 33 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia B x areia B



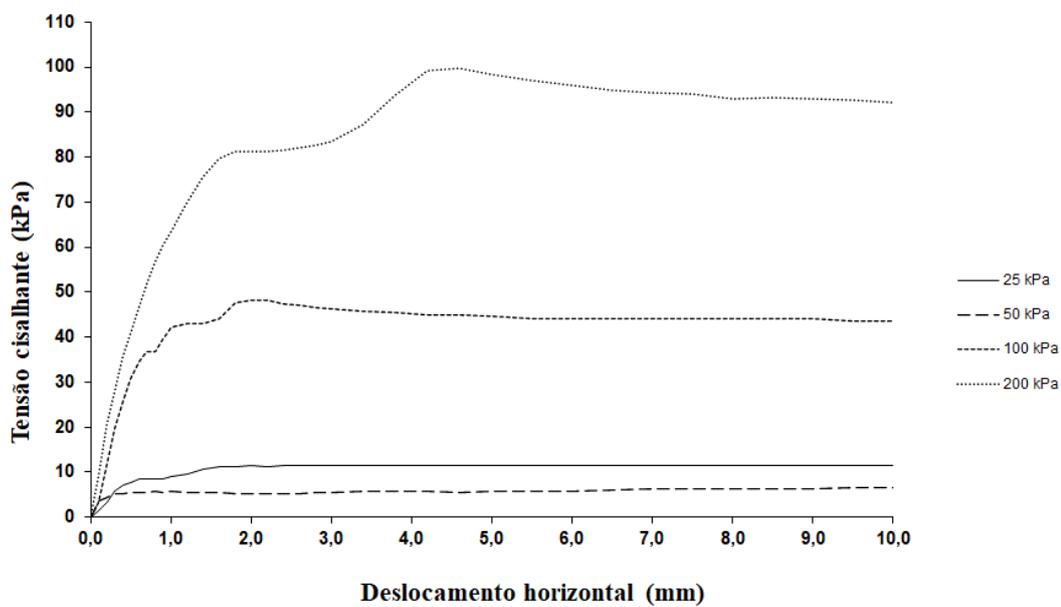
Fonte: Autora

Figura 34 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia B x areia B



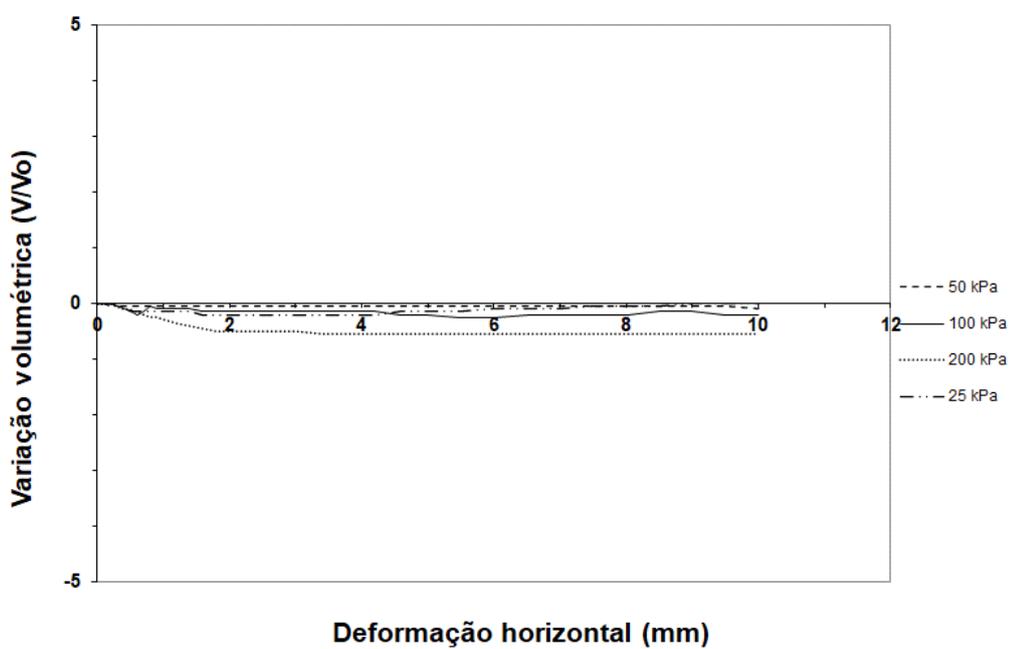
Fonte: Autora

Figura 35 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia B x Geomembrana lisa



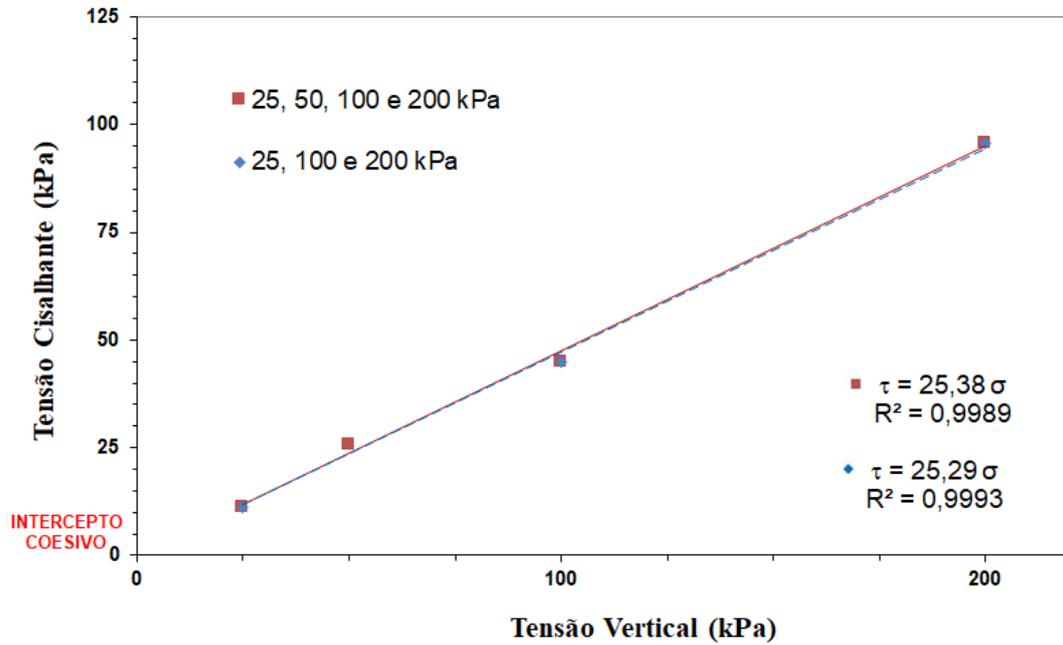
Fonte: Autora

Figura 36 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia B x Geomembrana lisa



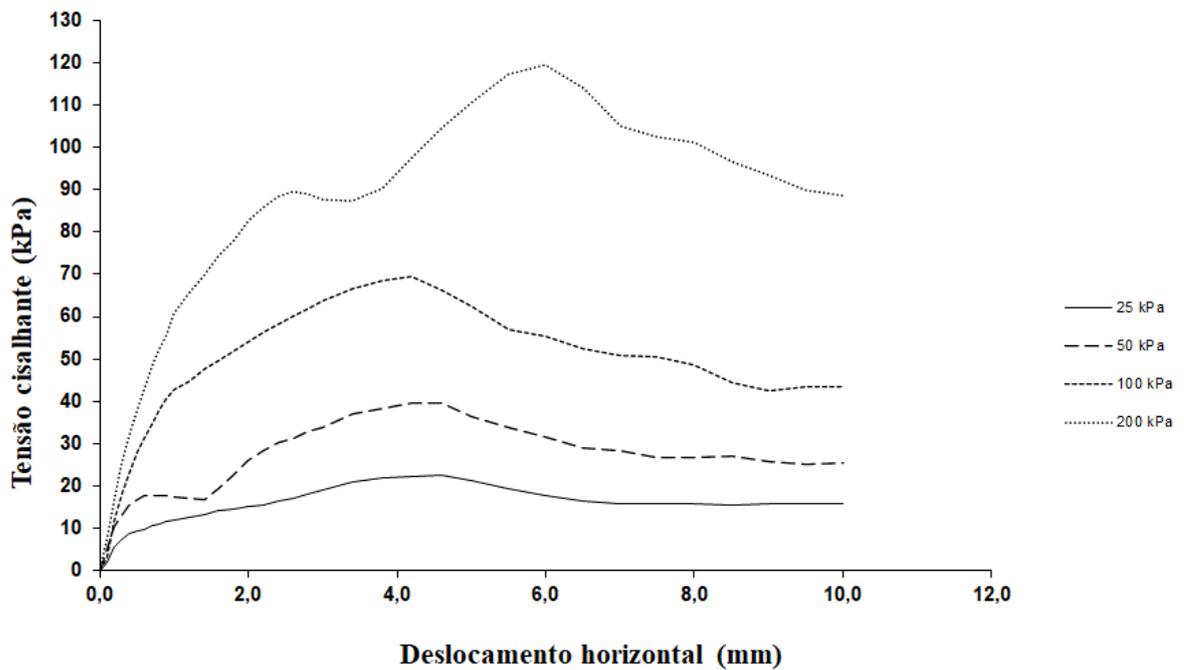
Fonte: Autora

Figura 37 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia B x Geomembrana lisa



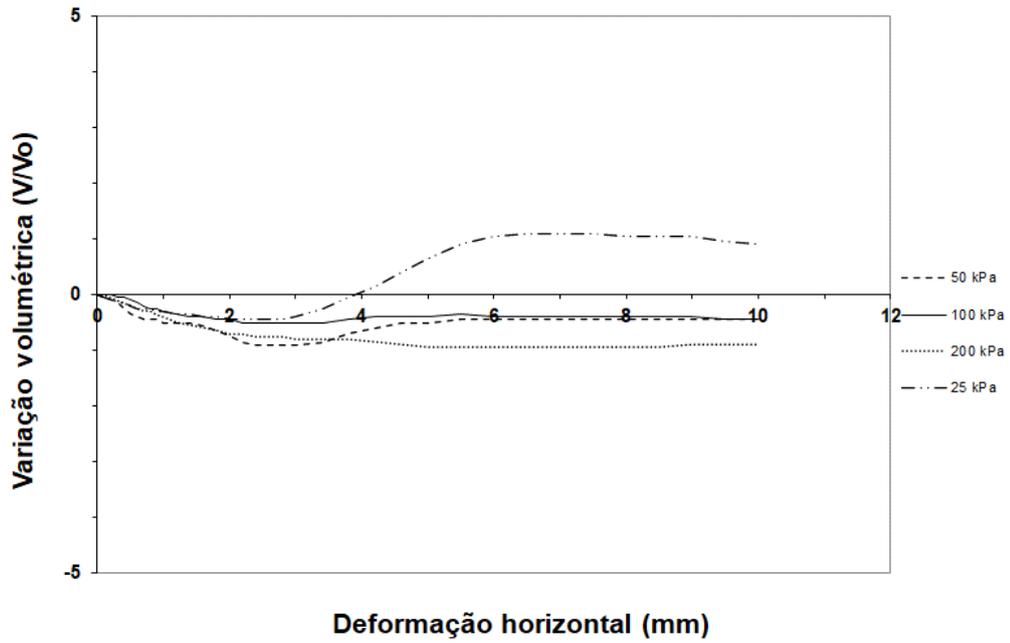
Fonte: Autora

Figura 38 – Gráfico de tensão cisalhante x deslocamento horizontal da interface areia B x Geomembrana texturizada



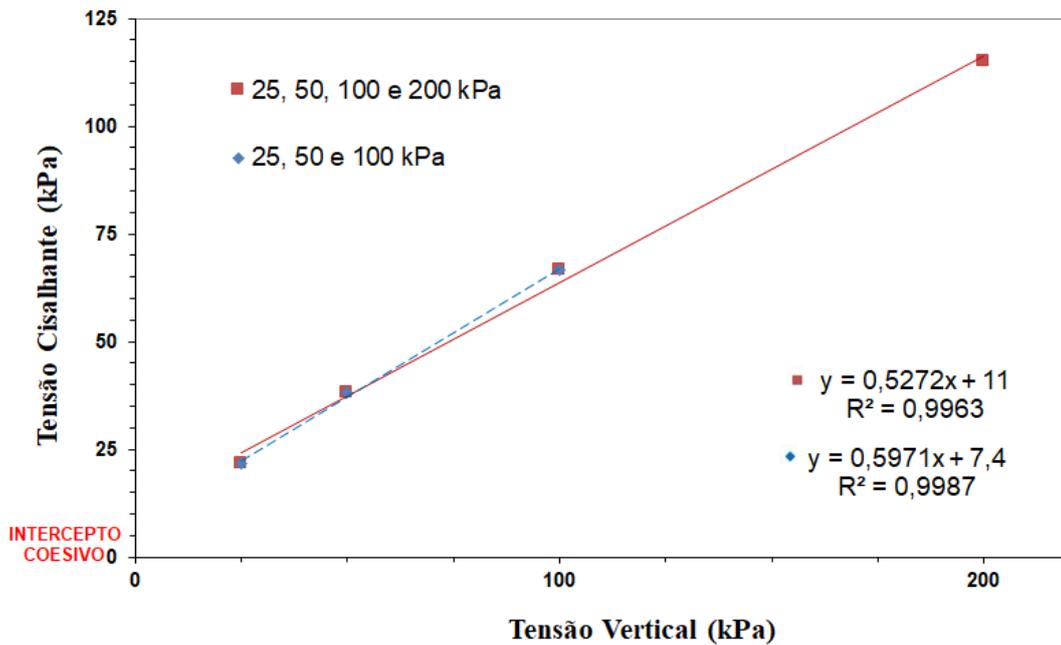
Fonte: Autora

Figura 39 – Gráfico de variação volumétrica x deformação horizontal da interface areia B x Geomembrana texturizada



Fonte: Autora

Figura 40 – Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante da interface areia B x Geomembrana texturizada



Fonte: Autora

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Alguns ajustes nos gráficos foram necessários anteriormente a etapa de análise dos resultados. Foram realizados ensaios para quatro tensões normais com a finalidade de que se alguma dessas tensões demonstrasse comportamento fora do esperado, seja por algum erro ocasionado pelo equipamento ou corpo de prova, esse ponto pode ser removido sem prejuízo de análise pois a reta de envoltória para uma interface é obtida a partir de três pontos.

Primeiramente, na interface areia B x areia B foi necessário remover o ponto de 200 kPa. O ângulo de atrito obtido com os quatro pontos de tensões foi 26,04° e após o ajuste o ângulo de atrito obtido foi 33,07°. O intercepto coesivo diminuiu de 11,31 para 2,95. O valor de R^2 aumentou, inicialmente se obteve 0,97 e por fim se obteve um R^2 de 0,99.

O segundo ajuste realizado foi na interface areia B x geomembrana lisa. O ponto de 50 kPa apresentou resistência menor que a tensão normal de 25 kPa, enquanto o comportamento esperado é quanto maior a tensão normal maior a resistência. Além disso o comportamento no gráfico tensão x deslocamento (Figura 35) apresenta um comportamento linear, com poucas variações. Esses comportamentos observados levam a conclusão de que provavelmente nesse ensaio a geomembrana descolou da lixa onde foi colada. Conforme recomendado em 3.3.4 a colagem deve ter um tempo de cura de 24 h para melhor fixação da geomembrana na lixa. Nem todos os corpos de prova desse estudo passaram por esse tempo de cura. Portanto, para melhorar as análises realizadas, o ponto de 50 kPa foi removido da reta que representa a envoltória da interface.

Por fim, a interface areia B x geomembrana texturizada também passou por ajuste. O ponto de 200 kPa foi removido da envoltória e com essa remoção o ângulo de atrito passou de 27,80° para 30,84°, o intercepto coesivo passou de +11 para +7,4 e o R^2 passou de 0,996 para 0,998.

A partir dos gráficos de tensão cisalhante x deslocamento horizontal (Figuras 23, 26, 29, 32, 35 e 38) é possível observar que as curvas não apresentam pico de resistência, indicando que provavelmente os corpos de prova se apresentavam em estado fofo. A causa principal para essa condição é atribuída a dificuldade na compactação dos corpos de prova. Conforme citado na metodologia, os corpos de prova foram preparados com o auxílio de uma mesa vibratória. Quando a mesa estava

ligada, observou-se que os grãos de areia escapavam na divisão da caixa bipartida utilizada para o ensaio. Ainda, por se tratar de uma mesa sem adaptação para vibração da caixa de cisalhamento, era necessário segurar a caixa durante sua compactação. Portanto, não foi possível obter uma boa compactação a partir das condições apresentadas.

Com relação aos gráficos que mostram a variação volumétrica do corpo de prova durante o ensaio (Figuras 24, 27, 30, 33, 36 e 39), em geral percebeu-se um comportamento similar, com redução de volume em todo o ensaio para tensões maiores e para tensões menores uma inicial diminuição de volume seguida de expansão volumétrica. Indicando comportamento similar ao proposto por Pinto (2006), citado em 2.7.

Com relação as envoltórias de resistência (Figuras 25, 28, 31, 34, 37 e 40), algumas análises podem ser realizadas com os resultados obtidos nesse estudo. A Tabela 8 resume os resultados fornecidos em 4.2, apresentando os ângulos de atrito interno para interface areia x areia e os ângulos de interface para os estudos com geomembranas. Além disso, apresenta o valor de coesão obtido para cada envoltória. Os valores de coesão apresentados não se referem a coesão real do material, mas ao intercepto coesivo das interfaces.

Tabela 8 - Ângulos de atrito interno das areias e ângulos de atrito de interfaces

Interface		Ângulo de atrito	Intercepto Coesivo
	Areia A	38,99	0
Areia A	Geomembrana lisa	28,04	0
	Geomembrana texturizada	26,88	8,5261
	Areia B	33,07	2,95
Areia B	Geomembrana lisa	25,29	0
	Geomembrana texturizada	30,84	7,4

Fonte: Autora

A Tabela 9 apresenta a eficiência dos ensaios de interfaces, obtida pela razão entre o ângulo de atrito de interface pelo ângulo de atrito interno da areia. A partir da Tabela 9 conclui-se que para a areia A a maior eficiência foi verificada para a interface areia x geomembrana lisa e para a areia B a maior eficiência foi verificada para a geomembrana texturizada.

Tabela 9 - Eficiência do estudo das interfaces

	Interface	Eficiência
	Areia A	100%
Areia A	Geomembrana lisa	72%
	Geomembrana texturizada	69%
	Areia B	100%
Areia B	Geomembrana lisa	76%
	Geomembrana texturizada	93%

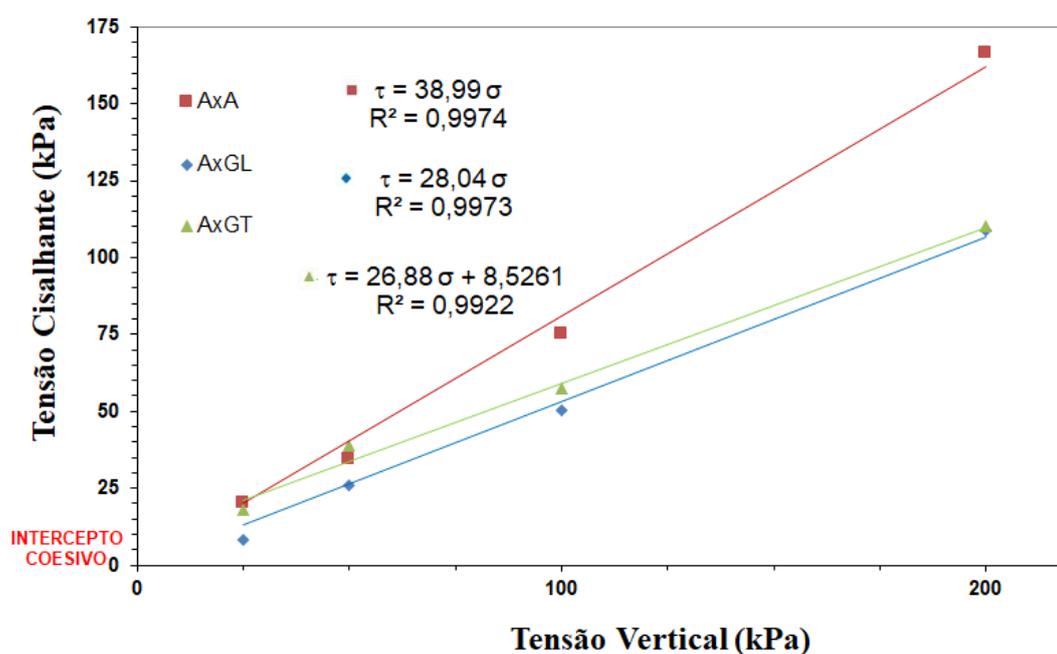
Fonte: Autora

4.3.1 Influência da rugosidade da geomembrana

A Figura 41 reúne os dados das interfaces que utilizam Areia A e a Figura 42 reúne os dados das interfaces que utilizam areia B, com o objetivo de comparar, para a mesma areia, a influência da geomembrana na resistência de interface.

A partir das Figuras 41 e 42, é possível afirmar que as envoltórias de resistência seguiram comportamentos similares, com valores de R^2 elevados.

Figura 41 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces com areia A



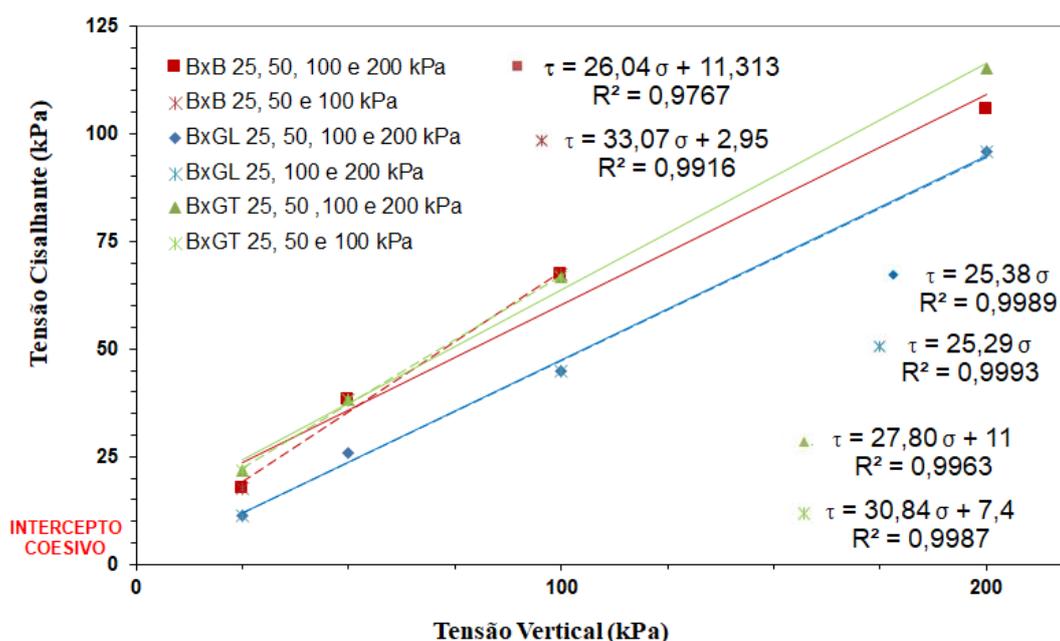
Fonte: Autora

A areia A apresentou maior resistência para a interface areia x areia, atingindo valores de ângulo de atrito na ordem de $38,99^\circ$, seguido da interface areia x geomembrana lisa, com valores na ordem de $28,04^\circ$ e por último a interface areia x geomembrana texturizada, que apresentou valor de resistência igual a $26,88^\circ$. Esse comportamento não representa o comportamento típico para análises da influência da geomembranas, em que, geralmente, o ângulo de atrito é maior para geomembrana texturizada.

Uma possível explicação para o comportamento obtido nesse estudo é que para superfícies mais rígidas (geomembrana texturizada) os grãos de areia tendem a deslizar sobre a superfície da geomembrana, enquanto para superfícies mais compressíveis, que é o caso da geomembrana lisa por ser mais flexível, os grãos tendem a rolar, provocando uma concentração de tensões e acréscimo de resistência cisalhante de interface.

Na Figura 42 são apresentadas as envoltórias para a areia B. Em linha contínua se apresenta a envoltória para todos os pontos, enquanto a linha tracejada apresenta a envoltória após os ajustes já citados.

Figura 42 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces com areia B

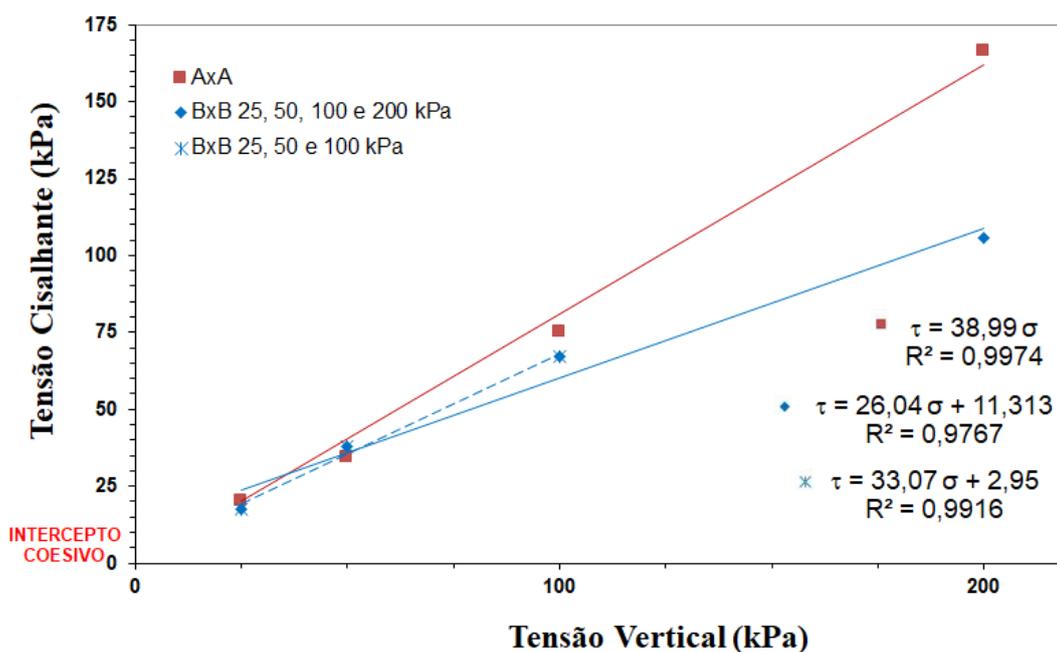


Para a areia B, verifica-se que o resultado obtido segue o que a literatura apresenta como resultado típico para resistência ao cisalhamento de interfaces, em que a interface solo x solo possui maior resistência decorrente do maior imbricamento entre os grãos e a interface solo x geomembrana texturizada possui maior resistência quando comparada com a geomembrana lisa, causada pela rugosidade do material, com ângulo de atrito para a interface areia x areia na ordem de $33,07^\circ$, para a interface areia x geomembrana texturizada o valor obtido é igual a $27,80^\circ$ e para geomembrana lisa o valor encontrado é $25,47^\circ$.

4.3.2 Influência da granulometria da areia

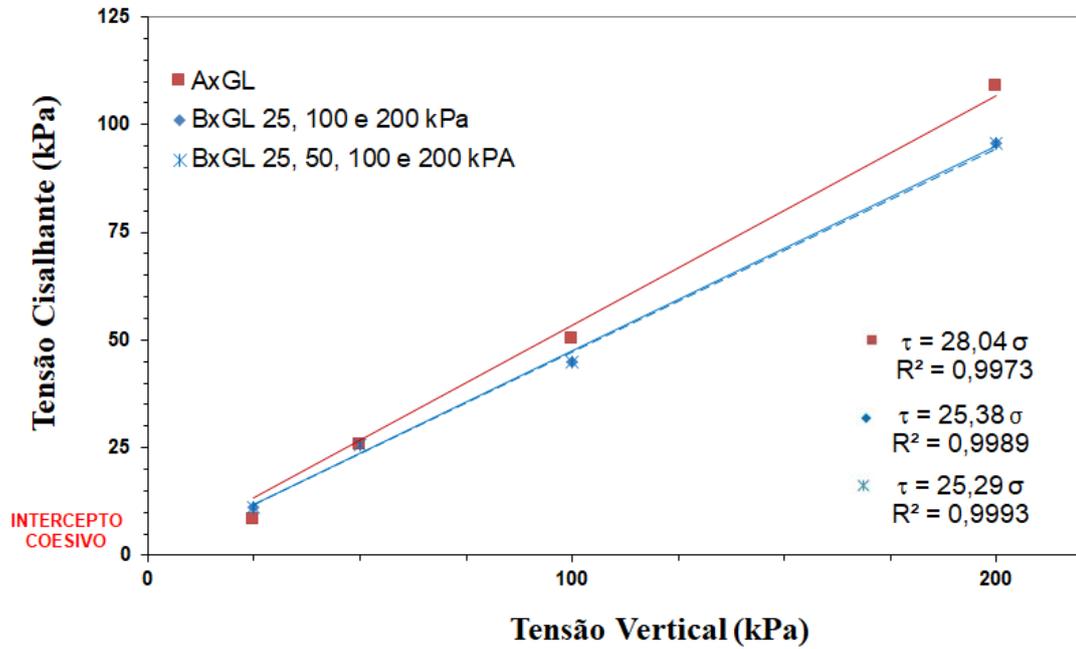
Com a finalidade de estudar a influência da granulometria da areia, as Figuras 43 a 45 apresentam em conjunto a mesma estrutura de interface ensaiada, variando a granulometria da areia. Portanto, as Figuras 43, 44 e 45 apresentam, respectivamente, a envoltória de resistência para a interface areia x areia, areia x geomembrana lisa e areia x geomembrana texturizada.

Figura 43 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces areia x areia



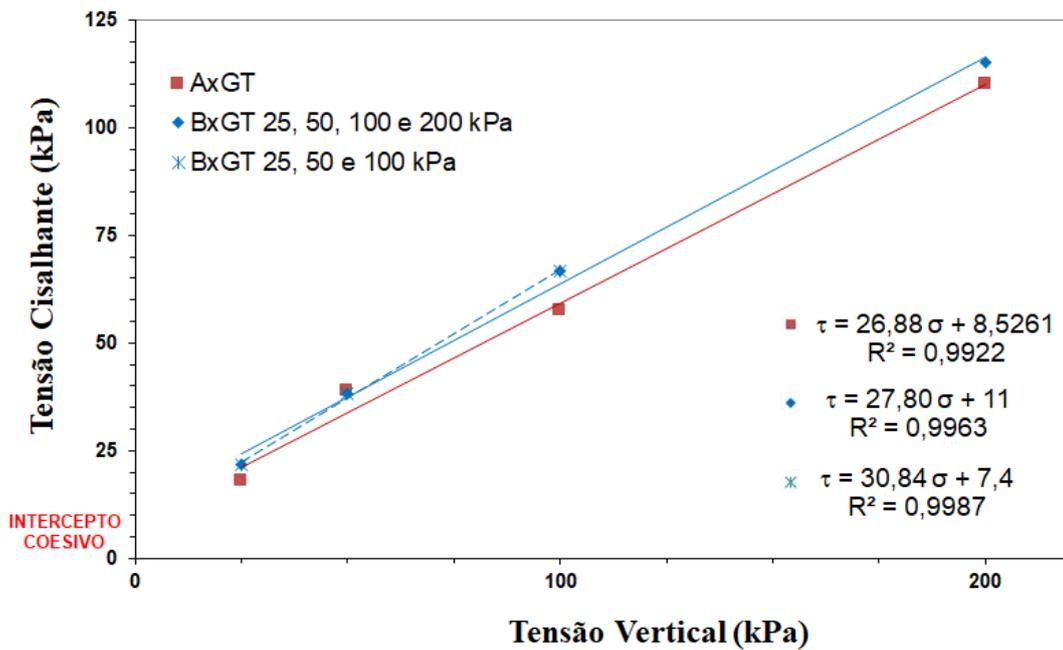
Fonte: Autora

Figura 44 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana lisa



Fonte: Autora

Figura 45 - Gráfico de tensão normal x tensão cisalhante das interfaces areia x geomembrana texturizada



Fonte: Autora

A partir das Figuras 43, 44 e 45 é possível concluir que, em geral, a areia A apresentou maior resistência ao cisalhamento do que a areia B. Para a interface areia x areia o ângulo de atrito interno da areia A encontrado é igual a $38,99^\circ$ e para a areia B é $33,07^\circ$. Para a interface areia x geomembrana lisa a areia A resultou em um ângulo de atrito de interface na ordem de $28,04^\circ$ enquanto a areia B apresentou $25,29^\circ$. Esse comportamento se deve ao maior imbricamento dos grãos e maior resistência do material, que possui granulometria mais grossa.

A interface areia x geomembrana texturizada apresentou maior ângulo de atrito para a areia B. A areia A apresentou ângulo de atrito de interface igual a $26,88^\circ$ enquanto a areia B apresentou $30,84^\circ$. Esse comportamento se encontra fora do esperado e é explicado por um provável melhor arranjo e interação das partículas da areia B com a geomembrana texturizada, aumentando a resistência da interface.

5 CONCLUSÃO

A utilização de diferentes materiais geossintéticos em camadas de impermeabilização de aterros sanitários vem crescendo nos últimos anos. A resistência de interface desses materiais é de grande importância para essas obras e para a verificação dos comportamentos das camadas formadas. Esse trabalho buscou comparar a resistência de interface de areia x geomembranas utilizando o ensaio de cisalhamento direto. Para isso, foi utilizado duas frações granulométricas de areia e duas geomembranas.

Primeiramente, foram realizados ensaios de caracterização física para duas frações de areia, com ensaios de massa específica, índice de vazios e granulometria. Verificou-se que a areia utilizada possui massa específica de $2,072 \text{ g/cm}^3$. Essa areia foi separada em duas frações, que foram denominadas areia A (passante na 1,2 mm e retida na 0,42 mm) e areia B (passante na 0,42 mm). A areia A apresentou índice de vazios máximo igual a 0,40 e índice de vazios mínimo igual a 0,26. Já a areia B apresentou índice de vazios máximo igual a 0,46 e índice de vazios mínimo igual a 0,22. Com relação a granulometria, a partir do coeficiente de não conformidade e do coeficiente de curvatura, tanto o material A quanto o material B foi classificado como areia uniforme e bem graduado.

Através do ensaio de cisalhamento direto foram obtidos, para as diferentes interfaces estudadas, os valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo. A partir dos resultados apresentados, torna-se possível concluir que as resistências ao cisalhamento são maiores para interfaces areia x areia. Com a formação de interfaces utilizando geomembranas, esse valor de resistência diminui. A influência da rugosidade da geomembrana foi avaliada e concluiu-se que, em geral, interfaces que utilizam geomembrana texturizada possuem resistência maior que aquelas que utilizam geomembrana lisa. Com relação a granulometria do material verificou-se que, em geral, os ensaios com areia A, de granulometria mais grossa, obtiveram resultados de resistência maiores que os ensaios com areia B, de granulometria mais fina. Portanto, pode-se concluir que os resultados obtidos são coerentes com a literatura, sendo que a textura e a granulometria do material apresentaram uma significativa influência nos resultados.

Recomendações para pesquisas futuras:

Com base no estudo apresentado, são recomendados como sugestões para pesquisas futuras utilizar outros ensaios de cisalhamento para obtenção dos parâmetros de resistência de interface, além de realizar ensaios com caixas em escala aumentada e por último a realização de mais ensaios com geossintéticos.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. F. **Estudo experimental do atrito da interface areia-geomembrana**. 2012.

American society for testing and materials (2014). ASTM D5321: Standard test methods for determining the coefficient of soil and geosynthetic or geosynthetic and geosynthetic friction by the direct shear method. USA.

ANDRADE, R. R. **Geossintéticos na construção de aterros sanitários**, 2018. Disponível em: <<http://diprotecgeo.com.br/blog/geossinteticos-na-construcao-de-aterros-sanitarios/>>. Acesso em: 30 out 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) – NBR 8419 - **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) – NBR 13896 – **Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021) – NBR ISO 10318 -1 – **Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016) – NBR 6457 – **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009) – NM 52 – **Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016) – NBR 7181 – **solo – análise granulométrica**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020) – NBR 16840 – **Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020) – NBR 16843 – **Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos**.

BOFF, F. E. **Avaliação do comportamento de uma mistura compactada de solos lateríticos frente a soluções de Cu⁺⁺, K⁺ e Cl⁻ em colunas de percolação**. 1999. Tese de Mestrado. São Carlos.

BONAPARTE, R; DANIEL, D.; KOERNER, R. M. **Assessment and recommendations for improving the performance of waste containment systems**. EPA-Environmental Protection Agency, 2002.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. 1999. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento)** - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CHIARELLO, G. P. **Estudo da interação de interfaces entre solo-geomembranas a partir de ensaios de cisalhamento direto.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, a ser publicado.

COSTA, C. M.L. et al. **Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos.** Polímeros, v. 18, 2008.

COSTA JUNIOR, S. L. **Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e diferentes geossintéticos.** 2020.

DANIEL, D. E. (Ed.). **Geotechnical practice for waste disposal.** Springer Science & Business Media, 1993.

FERNANDO, M.; COELHO, L. **GEOMEMBRANAS E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES.**

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

LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; DE SOUZA BUENO, B. **Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros sanitários.** Revista Tecnologia, v. 30, n. 2, 2009.

LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante.** 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENESES, H. B.; SOUSA, V. M. P. L. e FERNANDES, F. J. S. **Cartilha Técnica: Planejamento, Construção e Operação de Aterros para a Disposição Final de Resíduos Sólidos** – Teresina: TCE-PI, 2008 – 1ª Edição.

MONTEIRO, C. B. **Estudo de interface solo: geomembrana com variações de níveis de saturação do solo.** 2012.

PADRÓN SÁNCHEZ, N. **Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais.** 2018.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** Oficina de Textos, 2016.

REBELO, K. M. W. **Resistência de Interface entre geomembranas e solos através do ensaio de Ring Shear.** Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2003.

SALMASO, V. H. S. **Estudo dos parâmetros de resistência em areia utilizando o equipamento de cisalhamento direto de grande porte.** 2017.

STRAUSS, M. Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre. 1998.

WINGLER, K. M. R; VILAR, O. M. ESTUDO DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE ENTRE SOLOS E GEOMEMBRANAS ATRAVÉS DO ENSAIO DE RING SHEAR. Minerva, v. 2, n. 1, p. 41-51. 2005.