

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Iasmin Lívia Pereira dos Santos

Avaliação de Novas Texturas para Otimização da Resistência ao Cisalhamento de
Interface em Geomembranas

Juiz de Fora

2026

Iasmin Livia Pereira dos Santos

Avaliação de Novas Texturas para Otimização da Resistência ao Cisalhamento de Interface em Geomembranas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais

Orientador: Prof. Mario Vicente Riccio Filho

Coorientador: Prof. Heraldo Nunes Pitanga

Juiz de Fora

2026

IASMIN LÍVIA PEREIRA DOS SANTOS

Título: "Avaliação de novas texturas para otimização da resistência ao cisalhamento de interface em geomembranas."

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Estruturas e Materiais

Aprovada em 26/06/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mario Vicente Riccio Filho - Orientador e Presidente da Banca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Heraldo Nunes Pitanga - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha- Membro titular externo
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Prof. Dr. Gregório Luis Silva Araujo- Membro titular externo
Instituto Militar de Engenharia (IME)

Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques - Membro titular interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 02/07/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Mario Vicente Riccio Filho, Vice-Chefe de Departamento**, em 02/07/2026, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Heraldo Nunes Pitanga, Professor(a)**, em 02/07/2026, às 21:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Professor(a)**, em 03/07/2026, às 09:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gregório Luís Silva Araújo, Usuário Externo**, em 03/07/2026, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Henrique Martins Portelinha, Usuário Externo**, em 06/07/2026, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **3063023** e o código CRC **AC98050E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me permitir ter saúde e oportunidade de realizar esta pesquisa e avançar ainda mais nos meus conhecimentos profissionais. É um privilégio poder concluir mais esta etapa e me tornar mestra.

Tenho eterna gratidão à minha mãe que, desde sempre, me apoia de todas as formas possíveis para eu alcançar cada objetivo, através do seu carinho, amor e forte influência aos estudos desde a infância. Agradeço o apoio de toda a minha família e dos amigos que torcem por mim e incentivam o meu crescimento, em especial ao meu marido, que, desde o vestibular, esteve comigo, caminhando na mesma direção da dedicação aos estudos, e por estar sempre ao meu lado em cada etapa. Agradeço à minha avó, pelo carinho e disposição em me auxiliar sempre que necessário, e ao meu padrasto, por todo o suporte imensurável.

Agradeço aos meus orientadores Mário e Heraldo, por toda orientação e pelos conhecimentos técnicos transmitidos a mim, durante todo o período do mestrado. Sinto-me extremamente feliz e honrada pelo apoio fundamental em cada processo e por estar cercada de profissionais de grande referência para mim.

Destaco também a minha gratidão à professora Júlia Righi, pelo incentivo à pesquisa desde o período da graduação. A publicação de artigos e a participação em congressos ao lado dela trouxeram-me muito aprendizado e inspiração.

Agradeço por todo o suporte que recebi do técnico Lázaro, no laboratório de Mecânica dos Solos da UFJF, que me permitiu executar todos os ensaios necessários para a minha pesquisa.

Meus agradecimentos ao técnico Pedro, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do ICE (Instituto de Ciências Exatas), pelo suporte na realização das imagens ampliadas por microscópio eletrônico de varredura.

Agradeço à professora Flávia e ao seu aluno Filipe, por todo o apoio na confecção das geomembranas através da impressora 3D.

Agradeço ao Laboratório de Geossintéticos (LabGeo/UFSCar) da Universidade Federal de São Carlos e ao Professor Fernando Portelinha pela disponibilidade e apoio na realização de alguns ensaios de caracterização das geomembranas.

Finalmente, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora não só pelo ensino como também por todas as oportunidades. Agradeço ao PEC (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), pelo apoio financeiro recebido durante este período através da bolsa da UFJF, e também ao CNPq, pela concessão da bolsa, auxiliando-me no cumprimento desta jornada.

RESUMO

Os geossintéticos são materiais versáteis e aplicáveis na engenharia civil, sendo a geomembrana um dos seus tipos mais utilizados, considerando, principalmente, o seu emprego em obras de engenharia geoambiental. As geomembranas têm como principal função a barreira de fluxo de gases e líquidos, sendo aplicáveis em projetos de lagoas de contenção de água e resíduos, aterros sanitários, barragens e outras obras de terra. Porém, a interface da geomembrana com o solo é um fator que deve ser analisado, pois essa interação pode estar sujeita a problemas localizados de segurança e até mesmo ao colapso total da estrutura. Neste trabalho, serão analisados diferentes tipos de geomembranas em interface com uma areia, e o critério de análise utilizado será a resistência ao cisalhamento de interface, fator importante para a verificação da segurança de estruturas geotécnicas que contemplam geossintéticos. A textura e a rugosidade da geomembrana são fatores essenciais para a resistência ao cisalhamento de interface, visto que a aderência mecânica e o intertravamento mobilizados na zona de contato aumentam a adesão e o ângulo de atrito, fatores fundamentais para o aumento desta resistência. O presente trabalho tem como objetivo analisar diferentes tipos de geomembranas em interação com uma areia e propor novas texturas de geomembranas, visando proporcionar uma melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface. Para a realização deste trabalho, foram feitos ensaios de cisalhamento direto em quatro tipos de geomembranas existentes, sendo uma lisa e três texturizadas. Além disso, foram feitas caracterizações das geomembranas através dos ensaios de micrografia eletrônica, com a ampliação das imagens das geomembranas, com o objetivo de avaliar a superfície dos materiais. Com os resultados destas análises, foram propostos novos modelos de texturas de geomembranas, as quais foram modeladas em arquivos digitais e impressas em impressoras 3D. Conclui-se que as geomembranas impressas apresentaram resultados bem semelhantes aos encontrados pelas geomembranas comerciais, em termos de resistência de pico, porém mostraram-se superiores em termos de resistência ao cisalhamento na condição residual, principalmente para tensões normais mais baixas, demonstrando um potencial de utilização destas novas geomembranas, especialmente a GI12, principalmente para cobertura de aterros sanitários e impermeabilização de canais.

Palavras-chaves: geomembranas; texturas; rugosidade; cisalhamento direto; resistência ao cisalhamento de interface.

ABSTRACT

Geosynthetics are extremely versatile materials and they are applicable in civil engineering, with geomembranes, one of the most used types, considering, especially, its use in geoenvironmental engineering works. The main function of geomembranes is to act as a barrier against the flow of gases and liquids, being applicable in projects like water and waste containment ponds, landfills, dams, and other earthworks. However, the interface between the geomembrane and the soil is a critical factor that must be analyzed, because this interaction can be susceptible to localized safety problems and even the total collapse of the structure. In this work, different types of geomembranes in contact with a sand will be analyzed, and the analysis criterion used will be the interface shear strength, an important factor for verifying the safety of geotechnical structure that include geosynthetics. The texture and roughness of geomembrane are essential factors for the interface shear resistance, because the mechanical adhesion and interlocking mobilized in the contact zone increase adhesion and friction angle, which are fundamental factors for the increase of this resistance. The present work aims to analyze different types of geomembranes in interaction with a sand and to propose new textures of geomembranes, suitable to ensure an improvement in the interface shear strength parameters. To achieve this work, direct shear tests will be conducted on four existing types of geomembranes: one smooth and three textured. In addition, characterization of geomembranes will be carried out using scanning electron microscopy, using the enlargement of the geomembrane images, with the aim to evaluate the surface of the materials. With the results of these analyses, new models of geomembrane will be proposed, which will be modeled in digital files and printed using 3D printers. It is concluded that the printed geomembranes exhibited peak shear strength values very similar to those of commercial geomembranes. However, they showed superior residual shear strength performance, especially under lower normal stresses, demonstrating a potential for the use of these new geomembranes, especially the GI12, mainly for covering sanitary landfills and waterproofing channels.

Keywords: geomembranes; textures; roughness; direct shear; interface shear strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de geomembrana texturizada por matriz plana	26
Figura 2 - Exemplo de geomembrana texturizada por matriz balão	26
Figura 3 - Geomembrana em lagoa de armazenamento para irrigação	29
Figura 4 - Instalação de geomembrana.....	29
Figura 5 - Processo de instalação de geomembrana em aterro.....	29
Figura 6 - Geomembrana em aterro sanitário.....	30
Figura 7 - Geomembrana lisa – GL (escala real)	36
Figura 8 - Geomembrana lisa - GL (ampliação por MEV em 40 vezes)	37
Figura 9 - Geomembrana lisa - GL (ampliação por MEV em 600 vezes)	37
Figura 10 - Geomembrana texturizada 01 - GT1	38
Figura 11 - GT1A (ampliação por MEV em 40 vezes).....	38
Figura 12 - GT1F (ampliação por MEV em 40 vezes).....	39
Figura 13 - Geomembrana texturizada 02 - GT2	39
Figura 14 - GT2 (ampliação por MEV em 30 vezes).....	40
Figura 15 - Geomembrana texturizada 03 - GT3	40
Figura 16 - GT3 (ampliação por MEV em 30 vezes).....	41
Figura 17 - Geomembrana impressa lisa – GIL	41
Figura 18 - Geomembrana impressa com 3 ranhuras - GI3	42
Figura 19 - Geomembrana impressa com 6 ranhuras - GI6	42
Figura 20 - Geomembrana impressa com 9 ranhuras - GI9	43
Figura 21 - Geomembrana impressa com 12 ranhuras - GI12	43
Figura 22 - Curva Granulométrica da areia.....	46
Figura 23 - Esquema com pluviador de areia.....	47
Figura 24 - Pluviação da areia.....	47

Figura 25 - Caixa de cisalhamento direto sendo preenchida por areia.....	48
Figura 26 - Equipamento de Cisalhamento Direto	48
Figura 27 - Posicionamento da geomembrana na caixa de cisalhamento	49
Figura 28 - Desenvolvimento das geomembranas impressas pelo software	53
Figura 29 - Impressora 3D <i>Kyood3D Tycoon Slim</i>	54
Figura 30 - Esquema de rugosidade de uma geomembrana	54
Figura 31 - Áreas de influência da resistência	56
Figura 32 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico – AP	60
Figura 33 - Ângulos de atrito secantes de pico - AP	61
Figura 34 - Tensão cisalhante (kPa) versus D_h (cm) – AP	62
Figura 35 – D_v (cm) versus D_h (cm) – AP	63
Figura 36 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual - AP.....	64
Figura 37 - Ângulos de atritos secantes residuais - AP	64
Figura 38 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GL	65
Figura 39 - Ângulos de atrito secantes de pico para a interface areia- GL	66
Figura 40 - Tensão cisalhante (kPa) versus D_h (cm) para a interface areia– GL.....	67
Figura 41 – D_v (cm) versus D_h (cm) para a interface areia - GL	67
Figura 42 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia- GL	68
Figura 43 - Ângulos de atrito secantes residuais para a interface areia - GL.....	69
Figura 44 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia– GT1A	70
Figura 45 - Tensão cisalhante (kPa) versus D_h (cm) para a interface – GT1A	71
Figura 46 – D_v (cm) versus D_h (cm) para a interface – GT1A.....	71
Figura 47 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT1A	72

Figura 48 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia– GT1F	73
Figura 49 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia– GT1F	74
Figura 50 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia– GT1F.....	75
Figura 51 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT1F	75
Figura 52 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GT2...	76
Figura 53 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia – GT2.....	77
Figura 54 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia– GT2.....	77
Figura 55 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT2	78
Figura 56 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia– GT3 ..	79
Figura 57 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia– GT3.....	79
Figura 58 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia– GT3.....	80
Figura 59 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT3	81
Figura 60 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia - GIL...	82
Figura 61 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia - GIL.....	82
Figura 62 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia- GIL	83
Figura 63 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia– GIL	84
Figura 64 - Envoltória da resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GI3	85
Figura 65 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia - GI3	85
Figura 66 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia- GI3.....	86
Figura 67 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI3	87
Figura 68 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia - GI6 ...	88

Figura 69 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI6	89
Figura 70 – Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI6.....	89
Figura 71 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI6	90
Figura 72 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia - GI9 ...	91
Figura 73 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI9	92
Figura 74 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI9.....	93
Figura 75 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI9	93
Figura 76 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GI12 ..	94
Figura 77 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI12	95
Figura 78 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI12.....	95
Figura 79 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI12	96
Figura 80 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 37,5kPa	99
Figura 81 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 75kPa	100
Figura 82 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 150kPa	101
Figura 83 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 300kPa	101
Figura 84 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – geomembranas comerciais - condição de pico	103

Figura 85 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial - geomembranas impressas - condição de pico	103
Figura 86 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial - todas interfaces - condição de pico	104
Figura 87 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 37,5kPa	106
Figura 88 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 75kPa	107
Figura 89 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 150kPa	108
Figura 90 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 300kPa	109
Figura 91 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – geomembranas comerciais - condição residual	110
Figura 92 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – geomembranas impressas - condição residual	110
Figura 93 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – todas as interfaces - condição residual	111
Figura 94 – Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 37.5 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.....	112
Figura 95 – Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 75 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.	113
Figura 96 - Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 150 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.....	114
Figura 97 - Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 300 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.....	115
Figura 98 - Dilatância por interface	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das geomembranas comerciais	44
Tabela 2 - Espessura e altura de aspereza das geomembranas	44
Tabela 3 – Média das medidas das asperezas de duas geomembranas comerciais.	55
Tabela 4 - Desvios padrões das medidas.....	55
Tabela 5 - Medidas das geomembranas comerciais e impressas em 3D.....	55
Tabela 6 - Tabela Resumo.....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Programa de ensaios de Cisalhamento Direto.....	50
Quadro 2 - Resultados para a condição de pico	97
Quadro 3 - Resultados para a condição residual	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Areia pura
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CC	Coeficiente de curvatura
CDC	Cisalhamento direto convencional
CDM	Cisalhamento direto modificado
CNU	Coeficiente de não uniformidade
DR	Densidade Relativa
EPDM	Elastômero de Dieno-Propileno-Etileno
F_p	Força passiva
F_{at}	Força de atrito superficial
GIL	Geomembrana impressa lisa
GI3	Geomembrana impressa com 3 ranhuras
GI6	Geomembrana impressa com 6 ranhuras
GI9	Geomembrana impressa com 9 ranhuras
GI12	Geomembrana impressa com 12 ranhuras
GL	Geomembrana lisa
GT1	Geomembrana texturizada comercial 01
GT2	Geomembrana texturizada comercial 02
GT3	Geomembrana texturizada comercial 03

ICE	Instituto de Ciências Exatas
IGS	<i>International Geosynthetics Society</i>
LEEMS	Laboratório de Ensaios Especiais em Mecânica dos Solos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PI	Plano inclinado
PVC	Policloreto de Vinila
PP	Polipropileno
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Adesão aparente
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ_p	Ângulo de atrito de interface de pico
ϕ_r	Ângulo de atrito de interface residual
A	Área
A_p	Área passiva
A_a	Área de atrito
b	Base de cada aspereza
c	Coesão
cm/s	Centímetros por segundo
d	Distância entre as asperezas
D_r	Densidade relativa
Ψ	Dilatância
e	Espessura da geomembrana
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
F	Força
F_1	Força da parcela passiva
F_2	Força da parcela de atrito

FR	Força resultante
h	Altura de aspereza
k	Coeficiente de empuxo
k _p	Coeficiente de empuxo passivo
γ_s	Densidade real dos grãos
N	Força normal
σ	Tensão normal no corpo de prova
σ'_h	Tensão efetiva horizontal
σ'_v	Tensão efetiva vertical
τ	Tensão cisalhante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	23
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 GEOMEMBRANAS	25
2.2 INFLUÊNCIA DA ALTURA DA TEXTURA DA GEOMEMBRANA E DA DISTÂNCIA ENTRE AS ASPEREZAS	30
2.3 INTERFACE SOLO-GEOMEMBRANA E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	32
2.4 OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 GEOMEMBRANAS UTILIZADAS	36
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA UTILIZADA	45
3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....	46
Onde: ϕ_p = ângulo de atrito de pico, ϕ_r = ângulo de atrito residual.....	52
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS	52
3.5 CRIAÇÃO DE MODELOS DE GEOMEMBRANAS EM IMPRESSORAS 3D	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59

4.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA AREIA PURA - AP	59
4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA LISA - GL	65
4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 01 – GT1A e GT1F.....	69
4.3.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 01 (LADO ABERTO)	70
4.3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 01 (LADO FECHADO)	73
4.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 02 – GT2.....	76
4.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 03 – GT3.....	78
4.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA LISA – GIL	81
4.7 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 03 – GI3.....	84
4.8 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 06 – GI6.....	87
4.9 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 09 – GI9.....	90
4.10 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 12 – GI12.....	94
5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE INTERFACES	97
5.1 ENVOLTÓRIAS PARA A CONDIÇÃO DE PICO	97
5.2 ENVOLTÓRIAS PARA A CONDIÇÃO RESIDUAL.....	104
5.3 RESUMO E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	111
5.4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	117

6 CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

A seguir, serão apresentadas a contextualização sobre o tema em estudo e a justificativa para a realização da pesquisa. Em seguida, estarão expostos os principais objetivos que se pretende alcançar por meio da pesquisa e a organização do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os geossintéticos são materiais artificiais poliméricos extremamente versáteis, que podem ser utilizados em diversos tipos de obras e aplicações na Engenharia Civil, principalmente em obras geotécnicas e de proteção ambiental. A utilização desses materiais pode se dar em reforço de solo, estruturas de contenção, aterros sobre solos moles, taludes íngremes, drenagem, filtração, barreira para líquidos e gases, separação, barreira de sedimentos, entre outros cenários (Palmeira, 2018; Hasheminezhad et al., 2025).

A geomembrana é um dos tipos mais utilizados de geossintéticos. É um material impermeável e sua função está relacionada à separação e barreira de fluxos de gases e líquidos (Koerner, 2012; Rowe; Fan, 2024). As geomembranas são amplamente utilizadas em projetos de lagoas de contenção de água e resíduos e na impermeabilização de aterros sanitários (Silva; Daciolo; Correia, 2019; Zidan; Kemnitz; Ritter, 2024).

De acordo com Khan e Latha (2023), a aplicação de geomembranas em contato com solos pode representar um problema significativo de interação, constituindo um papel importante na determinação da estabilidade e desempenho de estruturas geotécnicas. A interface entre o solo e a geomembrana pode estar exposta a diversos problemas, como baixa resistência ao cisalhamento, problemas de estabilidade em taludes e em sistemas de drenagem, deformações excessivas, degradação da geomembrana, problemas com a textura e fatores ambientais, entre outros aspectos (Vangla; Gali, 2016; Xiao; Damians; Hu, 2025). Além disso, estudos mostram que a interface solo-geomembrana apresenta menor resistência ao cisalhamento do que o solo sozinho (Gao et al., 2010; Koerner, 2012; Punetha; Mohanty; Samanta, 2017).

Os primeiros estudos relacionados à interface solo-geomembrana ocorreram em meados de 1980, após a ocorrência de uma ruptura do aterro sanitário Kettleman Hills, na Califórnia, nos Estados Unidos. Nesse caso, uma grande massa de resíduos deslizou ao longo de uma interface com geomembrana (Rached; Sorour; Elsayed, 2022). De acordo com Jobi (2005), este acidente teve como causa a baixa resistência por atrito mobilizada na interface entre o solo e o

geossintético. Além deste caso, Koerner e Soong (2000) ressaltam que diversos outros acidentes ocorreram pelo mesmo motivo, concluindo que as resistências ao cisalhamento de interface são considerações essenciais e primordiais para a análise da variação das condições de segurança geotécnica de obras que contemplam geomembranas.

A instabilidade sob a ação de tensões cisalhantes aumenta o risco de deslizamento em taludes. Isso ocorre porque a superfície lisa da geomembrana em contato com solos pode apresentar pouco atrito e tender a formar zonas críticas de resistência (Adeleke et al., 2021). Por isso, é fundamental que sejam delimitados parâmetros seguros para a aplicação de geomembranas em contato com o solo na condição inclinada.

A aspereza da geomembrana no contato com o solo é um dos principais fatores a ser estudado, pois está diretamente relacionada com o nível de resistência que a estrutura apresentará (Sánchez; Araújo; Palmeira, 2018). De acordo com Araújo et al. (2022), a textura superficial das geomembranas desempenha um papel significativo na resistência ao cisalhamento de interface.

As geomembranas são fabricadas por diferentes tipos de processos, como, por exemplo, calandragem, extrusão ou espalhamento. Além disso, o processo pode ser feito por matriz balão ou matriz plana, sendo esta última suscetível a um melhor controle de espessura, com uma superfície mais uniforme. Independentemente do método aplicado, elas possuem uma limitação em relação à necessidade de muitas empresas e fabricantes envolvidos em cada processo de desenvolvimento do material, sendo, por isso, muito importante que haja controle de qualidade (Koerner, 2012; Vidal; Schiavon, 2023). Por se tratarem de processos padronizados, é mais difícil que haja uma especificação uniforme do espaçamento e altura de aspereza em toda a superfície do material, e as texturas podem ser produzidas de forma aleatória. Por isso, é interessante que haja uma análise a nível microscópico para definição dos melhores parâmetros a se considerar para uma melhor resistência.

Atualmente, existem diversas texturas de geomembranas disponíveis no mercado, porém ainda há uma escassez na literatura em relação à definição de características de texturização que apresentam maior ganho de resistência, e, por isso, ainda faltam especificações e orientações sobre quais características devem ser aprimoradas com o intuito de promover o aumento da resistência ao cisalhamento de interface (Soltz et al., 2020; Fowmes et al., 2017).

Ademais, de acordo com Adeleke, Kalumba e Oriokot (2019), os estudos sobre o papel da aspereza para as resistências de pico e residual em interfaces ainda são bastante limitados. É necessário investigar como a variação da altura da aspereza, a sua geometria e o comportamento da textura influenciam tanto na resistência máxima quanto na resistência residual de cisalhamento, sendo o comportamento residual de grande importância para a avaliação da estrutura em longo prazo.

Portanto, justifica-se a necessidade de estudos sobre a interface areia-geomembrana, a fim de que sejam estabelecidos parâmetros seguros, evitando a ruptura em estruturas geotécnicas por perda de resistência ao cisalhamento. Com o foco em otimizar a resistência ao cisalhamento de interface, serão analisados, nesta pesquisa, parâmetros de resistência ao cisalhamento de interface em geomembranas comerciais, e serão propostos e investigados novos modelos, com a variação de texturas de geomembranas, que serão obtidas em impressoras 3D, com o objetivo de projetar geometrias controladas, com travamento mecânico e fricção aprimorados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo principal propor um novo *design* de textura de geomembrana a fim de possibilitar uma melhor resistência de interface entre areia e geomembrana, trazendo uma maior segurança contra a ruptura por cisalhamento de interface.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa, complementares ao objetivo geral, são:

- Analisar parâmetros de algumas geomembranas comerciais existentes, relacionados à resistência ao cisalhamento de interface, considerando as condições de pico e residual;
- Fazer análises comparativas entre os dados dos ensaios de resistência ao cisalhamento de interface areia-geomembrana para definir os novos modelos de geomembranas que serão criados;
- Desenvolver novos modelos de texturas de geomembranas, através da impressão 3D, e compará-los com os modelos das geomembranas comerciais existentes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em seis capítulos e é apresentado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: é feita uma contextualização e justificativa para a realização da pesquisa. Além disso, são apresentados os objetivos e a organização do trabalho;

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: são apresentadas algumas definições importantes da literatura para o entendimento do trabalho, incluindo os temas sobre geomembranas, interface solo-geomembrana, resistência ao cisalhamento, influência da altura da textura da geomembrana e outros fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de interface;

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: neste capítulo, são apresentados a metodologia e os recursos utilizados para a realização da pesquisa. São apresentados os seguintes tópicos: geomembranas utilizadas, caracterização física da areia, moldagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto, ensaios de caracterização das geomembranas e criação de modelos de geomembranas em impressoras 3D;

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: são apresentados os resultados encontrados no decorrer dos ensaios realizados e as interpretações obtidas de cada um deles;

Capítulo 5 – Comparação de Resultados: neste capítulo, são feitas correlações, considerando as resistências ao cisalhamento de pico e residual, para cada nível de tensão normal aplicada e para os diferentes tipos de configurações empregadas em cada ensaio realizado;

Capítulo 6 – Conclusão: são feitos comentários sobre os principais pontos discutidos ao longo do trabalho e as principais considerações e conclusões obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão, serão apresentados os principais tópicos de fundamentação teórica para o trabalho, incluindo as principais características das geomembranas, influência da altura da textura da geomembrana, interface solo-geomembrana, resistência ao cisalhamento e outros fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de interface.

2.1 GEOMEMBRANAS

De acordo com Koerner (2012) e IGS BRASIL (2020), as geomembranas são materiais sintéticos utilizados como barreiras impermeáveis para líquidos e gases, sendo de grande aplicabilidade para obras de engenharia civil, incluindo aterros sanitários, barragens, canais de irrigação ou reservatórios, entre outros. Segundo Palmeira (2018), o coeficiente de permeabilidade das geomembranas permite esta condição, pois possui valores baixíssimos, podendo ser entre 10^{-11} e 10^{-13} cm/s. Este autor ressalta que as geomembranas apresentam propriedades importantes que devem ser avaliadas para uma boa especificação de projetos de engenharia e para a garantia da qualidade, segurança e desempenho. Algumas destas propriedades são: espessura, densidade, massa por unidade de área, altura de aspereza, permeabilidade, transmissividade, puncionamento, resistência ao impacto, resistência à tração e cisalhamento de interface.

As propriedades das geomembranas estão diretamente relacionadas com a produção desses materiais, incluindo a estrutura polimérica e a cristalinidade. A cristalinidade representa o grau de ordenação das moléculas, sendo que quanto maior este grau, maior é a cristalinidade. A cristalinidade gera uma maior densidade e coesão intermolecular, gerando maiores resistências mecânica e química (Gomes, 2024).

A manufatura das geomembranas envolve três processos diferentes, sendo eles extrusão, calandragem e espalhamento (Koerner, 2012; Gomes, 2024). De acordo com Gomes (2024), os principais tipos de geomembranas são: Polietileno de Alta Densidade (PEAD), Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), Policloreto de Vinila (PVC), Polipropileno (PP) e Elastômero de Dieno-Propileno-Etileno (EPDM). De acordo com dados fornecidos pelo Manual de Geossintéticos da Nortene (2016), as geomembranas de PEAD e PEBD podem ser fabricadas pelo processo de extrusão, através de equipamentos de matriz plana ou circular.

No processo de matriz plana, o polímero fundido é comprimido entre duas calandras paralelas, formando uma lâmina plana de geomembrana. Esse processo produz geomembranas mais espessas e com maior controle de espessura e uniformidade. Já o processo de matriz balão envolve a saída do polímero fundido em uma matriz circular, seguida da formação de um tubo inflado que é achatado. Neste caso, são produzidas geomembranas mais flexíveis e com menor controle de espessura, sendo estas tipicamente mais finas (Nortene, 2016). Além disso, as geomembranas texturizadas por matriz plana (Figura 1) possuem superfícies rugosas mais lineares, e, em contrapartida, as texturas por matriz balão (Figura 2) possuem superfícies rugosas desorganizadas e muito próximas entre si (Gomes, 2024).

Figura 1 - Exemplo de geomembrana texturizada por matriz plana



Fonte: Adaptado de Gomes, 2024

Figura 2 - Exemplo de geomembrana texturizada por matriz balão



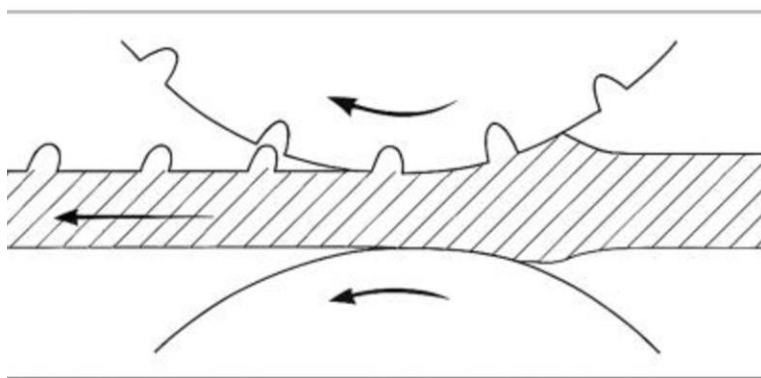
Fonte: Adaptado de Gomes, 2024

Destaca-se que, no processo de matriz balão, ou matriz circular o polímero fundido é extrudado através de uma matriz anular, formando um tubo contínuo que é expandido pela injeção de ar, caracterizando o processo conhecido como “*blown film*”. Neste caso, a textura é produzida durante a coextrusão, geralmente pela incorporação de um agente expensor, como nitrogênio, às camadas superficiais do material. Na fase do resfriamento, pequenas bolhas formadas pelo gás são rompidas, originando asperidades distribuídas de forma aleatória sobre a superfície da geomembrana. Como resultado, a textura apresenta geometria irregular e maior variabilidade de altura das asperidades quando comparada à obtida por matriz plana (Aparicio-Ardila e Silva, 2026).

De acordo com estudos e análises como o de Aparicio-Ardila e Silva (2026), do ponto de vista geotécnico, a escolha do processo de fabricação influencia principalmente a morfologia da superfície da geomembrana e, conseqüentemente, seu comportamento de interface com solos e outros geossintéticos. A geometria, a altura e a distribuição das asperidades controlam os mecanismos de atrito e de intertravamento mecânico entre os materiais, podendo afetar significativamente a resistência ao cisalhamento da interface e, por consequência, o desempenho de sistemas de impermeabilização, como aterros sanitários, barragens de rejeitos e reservatórios.

A Figura 3 apresenta um esquema de como a matriz plana é fabricada, ressalta-se que para este caso, a textura é moldada mecanicamente, em que o rolo é gravado como um molde e produz texturas bastante uniformes, com mesma altura de asperidade e espaçamento entre elas. Uma vantagem geotécnica é que este controle de textura permite um contato mais uniforme com o solo.

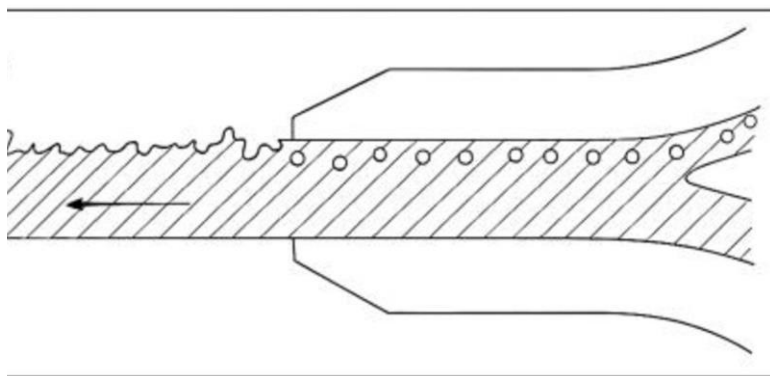
Figura 3 - Esquema de fabricação de geomembrana por matriz plana



Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila e Silva (2026)

Na Figura 4, é possível observar um esquema de processo de fabricação de uma geomembrana produzida por matriz balão. Neste caso, não há uma especificação bem definida, pois as texturas são formadas espontaneamente durante o resfriamento e rompimento de bolhas de gás. Neste caso, a textura é aleatória, porém é considerada mais integrada ao material.

Figura 4 - Esquema de fabricação de geomembrana por matriz balão



Fonte: Adaptado de Aparicio-Ardila e Silva (2026)

O processo de fabricação aliado à textura do geossintético é um fator importante para a avaliação da resistência ao cisalhamento de interface. De acordo com Monteiro (2012), as geomembranas texturizadas apresentam maiores valores de ângulo de atrito em comparação com as geomembranas lisas e podem ser consideradas mais sensíveis à mobilização de resistência friccional na interface com a camada de solo. Este autor ressalta que a geomembrana lisa exibe um ângulo de atrito de interface menor que o ângulo de atrito do próprio solo.

A seguir, são apresentados alguns exemplos de utilização de geomembranas em casos reais de obras de engenharia. Na Figura 5, é possível observar o uso de um geomembrana em uma lagoa de armazenamento para irrigação. A Figura 6 e a Figura 7 apresentam instalações de geomembranas no campo. A Figura 8 mostra a inserção de uma geomembrana em um talude de uma célula de um aterro sanitário de resíduos perigosos.

Figura 5 - Geomembrana em lagoa de armazenamento para irrigação



Fonte: CTG ABINT, 2022

Figura 6 - Instalação de geomembrana



Fonte: Lopes, Barroso e Neves (2021)

Figura 7 - Processo de instalação de geomembrana em aterro



Fonte: IGS Brasil, 2018

Figura 8 - Geomembrana em aterro sanitário



Fonte: Lopes, Barroso e Neves (2021)

2.2 INFLUÊNCIA DA ALTURA DA TEXTURA DA GEOMEMBRANA E DA DISTÂNCIA ENTRE AS ASPEREZAS

Vários estudos (Gomes; Araújo; Júnior, 2024; Tanga et al., 2023; Araújo et al., 2022; Sanchez, 2018) mostraram que a altura das asperezas da geomembrana é um dos principais fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de interface. Além disso, de acordo com os ensaios feitos nestas pesquisas, foi identificado que, para a interface entre areia e geomembrana em um ensaio de cisalhamento direto convencional, o que mais interfere nos resultados são o ângulo de atrito do solo e a altura da aspereza da geomembrana.

O aumento da altura da textura não necessariamente trará maior ganho de resistência. Em regra, é positivo, porém é necessário que se façam ensaios para verificar até que ponto essa altura é benéfica, pois pode chegar em um ponto que os picos das texturas podem ser cisalhados em caso de tensões normais muito altas (IGS Brasil, 2020). No entanto, de acordo com Adeleke et al. (2021), ainda não há especificações na literatura quanto às características da textura das superfícies que maximizam a resistência ao cisalhamento. Estes autores destacaram que o aumento da aspereza e altura das texturas promove aumento significativo no ângulo de atrito de interface. Através dos ensaios realizados, verificou-se um aumento de 20° para o valor de pico do ângulo de atrito de interface. Para Blond e Elie (2006), até uma altura de aspereza de 0,5mm, ocorre um aumento da resistência ao cisalhamento de interface, mas, acima disso, não é gerado um ganho significativo de força resistente cisalhante.

Adicionalmente, os estudos de Júnior et al. (2023) mostraram que a altura das asperezas influencia em outros diversos parâmetros de resistência para a geomembrana, como, por exemplo, resistência à ruptura, resistência ao escoamento, alongamento na ruptura, resistência ao rasgo e resistência à perfuração. De acordo com esses mesmos estudos, foi constatado também que o espaçamento entre as asperezas também é importante em termos de análise de interface solo-geomembrana.

Em relação ao espaçamento entre as texturas, ou distância entre as asperezas, pode-se dizer que é importante fazer uma análise de qual é o espaçamento mais favorável ao ganho de resistência, e isso pode ser feito através de prototipagem e ensaios, pois, de acordo com os estudos de Fowmes et al. (2017), um espaçamento muito grande pode ser prejudicial para a resistência ao cisalhamento, mas um espaçamento muito pequeno também pode gerar diminuição da resistência. No estudo feito entre interfaces de argila e geomembrana, o espaçamento ideal encontrado foi entre 7 e 9mm de distância.

Além disso, os estudos feitos por Xu, Shi e Li (2023) demonstram a grande importância que a textura apresenta na geomembrana para o ganho de resistência ao cisalhamento. Os ensaios realizados consistiram na avaliação de geomembranas comerciais antes e após a ação da tensão normal aplicada, e os resultados demonstraram que o desgaste das asperezas das geomembranas alteram significativamente o desempenho de interface. Também foi constatado que o desgaste das asperezas e o espaçamento entre elas afetam o comportamento pós-pico, sendo fundamental que sejam analisados novos *designs* de geomembranas para a melhoria da segurança neste aspecto.

Os estudos e ensaios feitos por Xu et al. (2025) demonstraram grande influência da altura da textura em relação ao comportamento da interface na condição pós-pico, ou seja, residual. Os autores fizeram testes em anel de cisalhamento com deslocamento de até 3m, e as interfaces com geotêxteis e geomembranas exibiram aumento da resistência ao cisalhamento residual na medida em que se elevava a altura das asperezas, deixando claro que o intertravamento mecânico permanecia efetivo mesmo na condição residual.

Outro fator relevante está relacionado à influência da textura superficial da geomembrana na forma da curva tensão-deslocamento. Adeleke et al. (2021) evidenciaram que as geomembranas lisas apresentaram um comportamento, em que ocorre uma elevação gradual da tensão de cisalhamento até o pico seguida de nenhuma ou pouquíssima redução pós-pico. Já

as geomembranas texturizadas apresentaram uma elevação significativa da tensão de cisalhamento até o pico, com posterior redução por deformação, caracterizada por mecanismos de arraste, rupturas de fibras e degradação das asperezas.

2.3 INTERFACE SOLO-GEOMEMBRANA E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

De acordo com Junior et al. (2023), ao se instalar uma geomembrana em uma camada de solo, é criada uma zona de contato. Nesta zona de contato, a tensão normal atua aumentando a força de atrito e, conseqüentemente, aumentando a força que resiste ao deslizamento, ou seja, a resistência ao cisalhamento. A resistência ao cisalhamento de interface depende do ângulo de atrito entre os materiais, que é o ângulo de interface, e da adesão, que é semelhante à coesão aparente do solo (Lopes; Silva, 2024).

Alguns estudos (Gao et al., 2010; Koerner, 2012; Punetha; Mohanty; Samanta, 2017; Chiarello, 2022) declaram que a inserção de um geossintético em um solo promove uma diminuição do intertravamento das partículas do solo, o que faz com que diminua a resistência ao cisalhamento da interface, sendo inferior à resistência do solo puro em questão. Além disso, quando se considera a inserção da geomembrana lisa em um solo, esta diminuição da resistência é ainda mais significativa. Ademais, o comportamento típico da interface areia-geomembrana apresenta valores inferiores de ângulo de atrito em comparação com o ângulo de atrito da areia sozinha. A aspereza tem a função de diminuir ou anular esta perda de resistência ao cisalhamento de interface ou mesmo aumentar esta resistência.

De acordo com estudos de Vangla e Gali (2016) e Khan e Latha (2023), a interface de geomembranas com areias finas pode apresentar um comportamento com adesão bastante pequena, devido à menor aspereza das partículas finas e também a uma menor capacidade de penetração do solo nas texturas das geomembranas. Para as interfaces com geomembranas lisas, a adesão será igual a zero. Entretanto, é importante ressaltar que esses parâmetros podem sofrer alterações quando é analisada a condição pós-pico. Nos estudos feitos por Júnior et al. (2023), em que foram feitos diversos ensaios com diferentes interfaces para solo e geossintético, os valores de adesão encontrados, em kPa, variaram entre 0,6 a 4,9, independentemente da condição residual ou de pico.

O estudo da interface é essencial para que sejam estabelecidos parâmetros mais seguros e que permitam a construção de taludes mais íngremes. Além disso, em obras como aterros sanitários e barragens, a estabilidade global depende muito da resistência ao cisalhamento entre

as interfaces (Palmeira, 2018). Quando se trata de interface solo-geomembrana, a textura é um dos principais fatores a serem considerados, pois a superfície, sendo ela lisa ou rugosa, influencia diretamente nos mecanismos de aderência e atrito (Lopes; Silva, 2024).

Considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, a tensão normal aplicada também é determinante para a avaliação da resistência ao cisalhamento em interfaces. Como a tensão normal aplicada é diretamente proporcional à tensão cisalhante, o aumento da tensão normal gera ganho na resistência. Diversos artigos comprovam essa teoria, sendo que, independentemente do tipo de ensaio realizado, do solo utilizado ou geossintético empregado na interface, haverá maior resistência ao cisalhamento com o aumento da tensão normal, gerando um maior intertravamento (Muluti et al., 2023; Avelar et al., 2023; Bacas; Cañizal; Konietzky, 2015).

Para a determinação da resistência ao cisalhamento de interface entre solo e geossintéticos, alguns ensaios podem ser realizados, como, por exemplo, o ensaio de cisalhamento direto convencional (CDC), o ensaio de cisalhamento direto modificado (CDM) e o ensaio de plano inclinado (PI) (Sanchez, 2018). O ensaio de cisalhamento direto convencional em interfaces com geossintéticos é normatizado pela ASTM D5321/ D5321 M (ASTM, 2021), sendo feito a partir da aplicação de uma tensão normal em uma caixa de cisalhamento e com velocidade de deslocamento constante. Este ensaio é recomendado, pois é simples e de fácil execução, além de ser indicado para a aplicação de altas tensões normais. Já o ensaio de cisalhamento direto modificado possui o mesmo princípio do ensaio convencional, porém tem-se a utilização de dimensões maiores.

Pitanga, Gourc e Vilar (2009) realizaram estudos e ensaios de resistência ao cisalhamento em plano inclinado e destacaram que este tipo de ensaio é mais recomendado para a avaliação sob baixas tensões normais. Além disso, através dos resultados obtidos, foi possível discutir que o comportamento de interface, no plano inclinado, ocorre em três fases: estática, em que permanece imóvel; transitória, onde ocorre o início da movimentação e o elemento desce gradualmente; e deslizamento não estabilizado, em que o elemento desliza em uma velocidade crescente. O ensaio de plano inclinado permite uma simulação mais realista das condições de campo e tende a ter superfícies de áreas de contato maiores. No entanto, o ensaio de plano inclinado apresenta limitação em caso de simulação de condições sujeitas à maiores tensões normais (Sanchez, 2018).

Segundo Markou e Evangelou (2018), a resistência ao cisalhamento da interface solo–geomembrana é influenciada simultaneamente pelas propriedades do solo e pelas características da geomembrana, destacando-se a rugosidade superficial, o tipo de polímero e a forma dos grãos do material granular. Os estudos mostraram que areias com grãos subangulares desenvolveram maiores resistências de interface do que areias de grãos arredondados, reforçando que as características do material de contato também exercem influência significativa no comportamento da interface. Além disso, de acordo com este mesmo estudo dos autores, os resultados demonstram que modificações na textura superficial das geomembranas constituem uma estratégia promissora para aumentar a resistência ao cisalhamento em sistemas geotécnicos.

2.4 OUTROS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE

Além dos fatores mencionados, existem condições que interferem na resistência ao cisalhamento de interface entre solo e geomembrana. De acordo com os estudos e revisões bibliográficas de Chiarello (2022), alguns fatores podem ser considerados importantes, como, por exemplo:

- Flexibilidade da geomembrana: materiais mais flexíveis, como os de PVC, apresentam maiores ângulos de atrito, em comparação com materiais mais rígidos;
- Umidade: quanto maior for a umidade, menor será a resistência ao cisalhamento de interface;
- Temperatura: os valores de ângulo de atrito aumentam em torno de 3% a cada °C aumentado. Além disso, o aquecimento pode provocar um envelhecimento do material, alterando as suas características;
- Escala de ensaio: os parâmetros variam de acordo com o tamanho da caixa de cisalhamento, sendo que quanto maior a escala, maiores são os valores de coesão e ângulo de atrito;
- Tensão normal aplicada: quanto maior o carregamento aplicado, maior é a tensão cisalhante, devido ao aumento da parcela atritiva, ocorrida pelo imbricamento entre solo e geomembrana;

- Granulometria do solo: a angularidade dos grãos favorece o bloqueio e travamento do solo no geossintético, proporcionando uma maior mobilização de tensões cisalhantes;
- Envelhecimento: este fator promove a alteração das condições físicas e químicas que podem, conseqüentemente, alterar propriedades importantes relacionadas à resistência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentadas as metodologias empregadas para a realização do estudo, incluindo as informações das geomembranas utilizadas (comerciais e impressas), a caracterização física da areia utilizada, o procedimento de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento direto, os ensaios de caracterização das geomembranas e o método de criação dos novos modelos de geomembranas em impressora 3D.

3.1 GEOMEMBRANAS UTILIZADAS

Foram utilizadas quatro geomembranas comerciais, sendo uma geomembrana lisa e três geomembranas texturizadas, e, em uma destas texturizadas, foram feitos ensaios nas duas faces. Além das geomembranas comerciais, foram efetuados ensaios de cisalhamento direto em algumas geomembranas impressas em impressora 3D, com padrões de texturas propostos nesta pesquisa.

As geomembranas comerciais utilizadas nos ensaios são descritas a seguir. São apresentadas fotos em escala real e ampliadas por meio do uso de MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). Os ensaios de MEV foram executados no Laboratório de Microscopia Eletrônica da UFJF, e o equipamento utilizado foi o modelo Quanta 250, ano 2010.

- Geomembrana lisa comercial, chamada de GL (Figura 7, Figura 8 e Figura 9);

Figura 9 - Geomembrana lisa – GL (escala real)

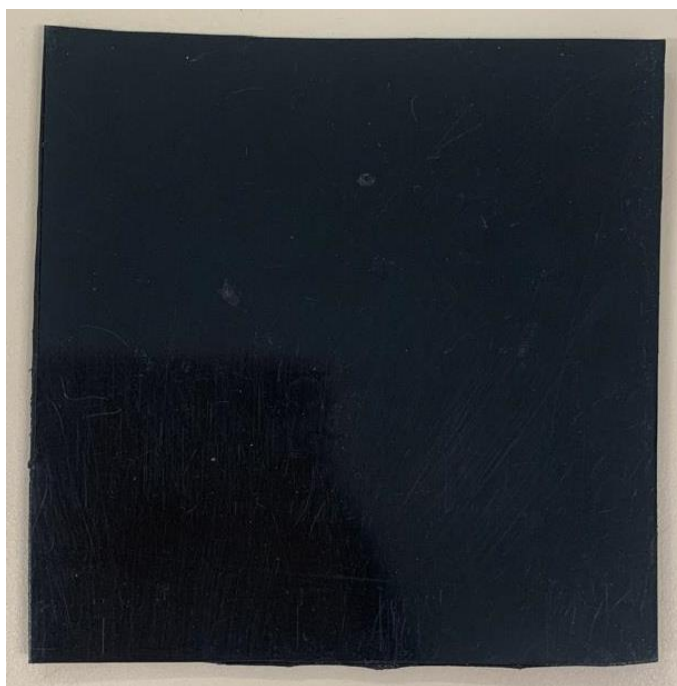


Figura 10 - Geomembrana lisa - GL (ampliação por MEV em 40 vezes)

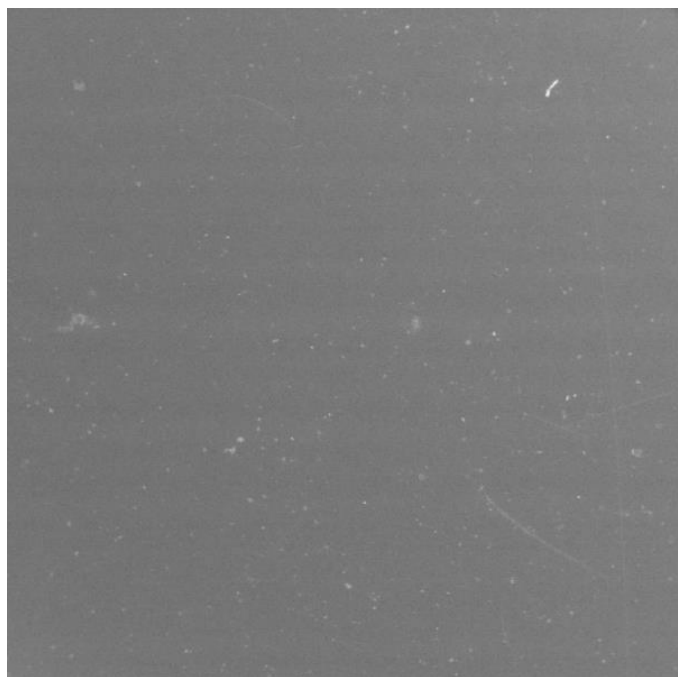
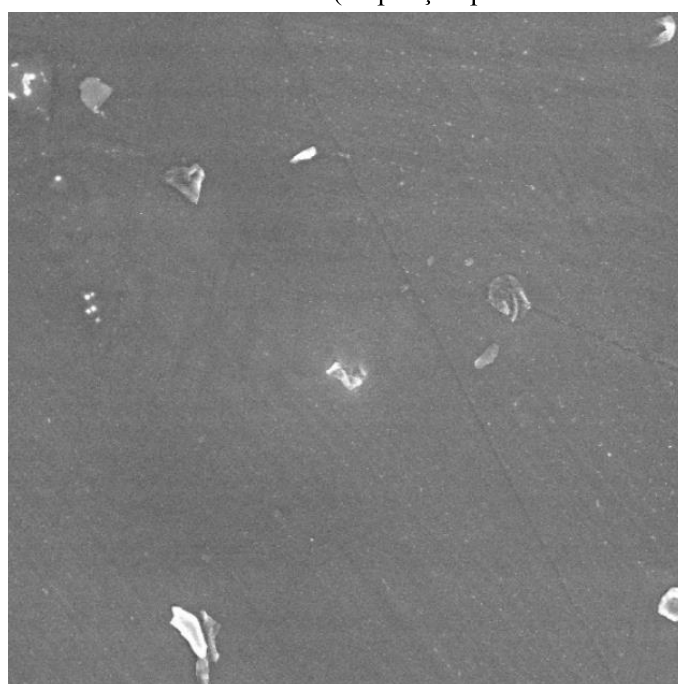


Figura 11 - Geomembrana lisa - GL (ampliação por MEV em 600 vezes)



- Geomembrana texturizada comercial 01, chamada de GT1: como esta geomembrana possui dois tipos diferentes de textura a depender do lado (Figura 10), foram feitos ensaios para estas duas condições, sendo a primeira para o lado com textura mais aberta [GT1A (a)] e a segunda com o lado com a textura mais fechada [GT1F (b)]. A imagem

ampliada da GT1A é apresentada na Figura 11, e a imagem ampliada da GT1F está na Figura 12;

Figura 12 - Geomembrana texturizada 01 - GT1

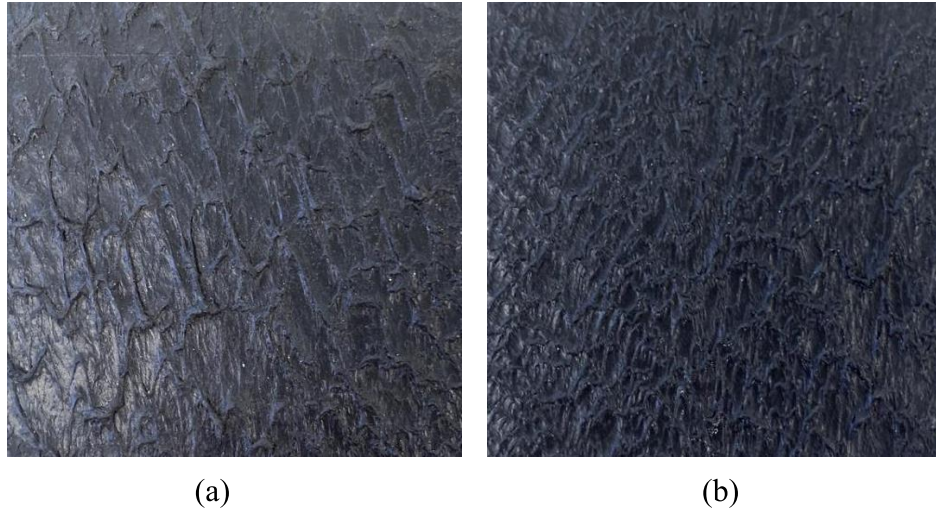


Figura 13 - GT1A (ampliação por MEV em 40 vezes)

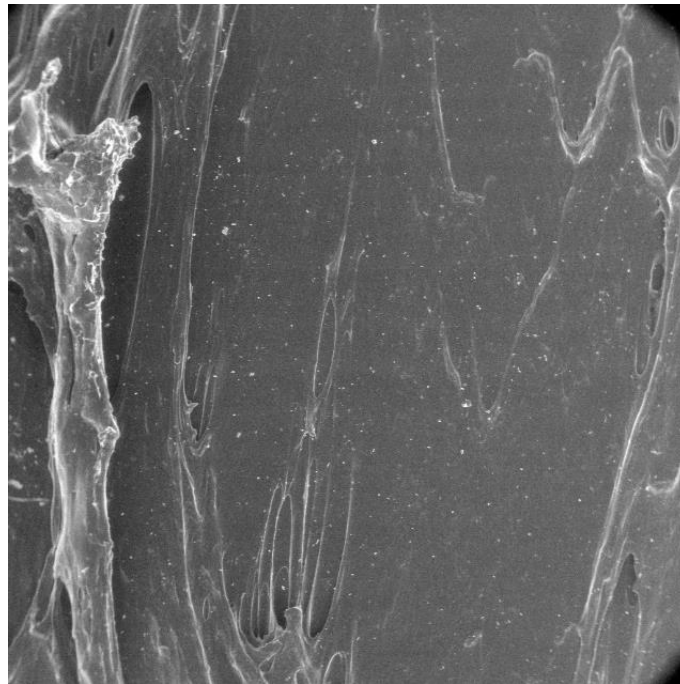
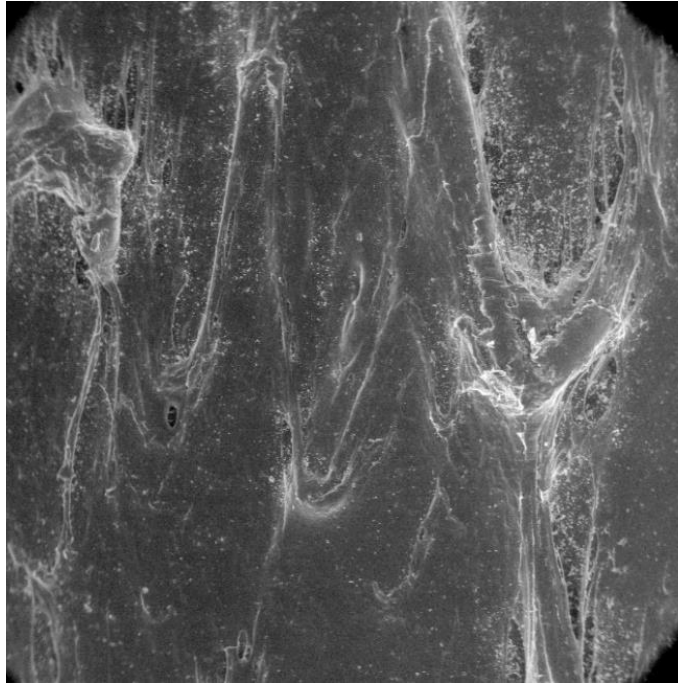


Figura 14 - GT1F (ampliação por MEV em 40 vezes)

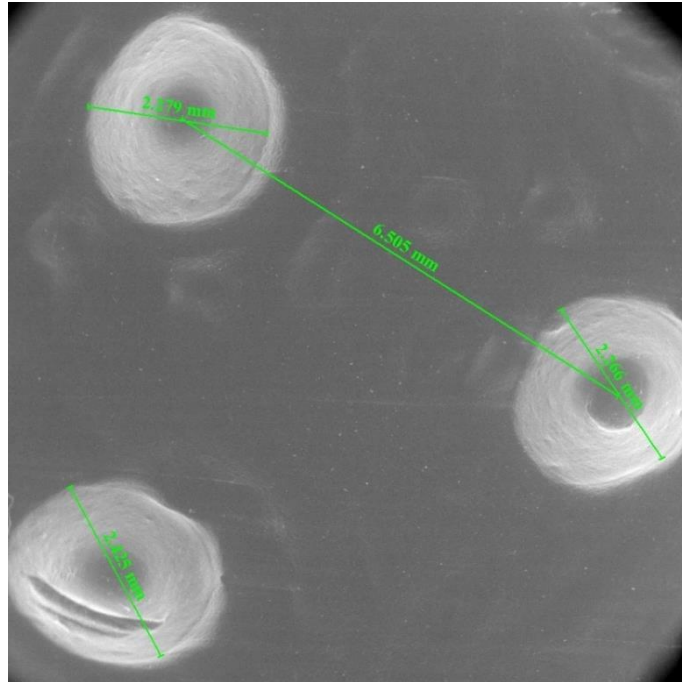


- Geomembrana texturizada comercial 02, chamada de GT2 (Figura 13 e Figura 14);

Figura 15 - Geomembrana texturizada 02 - GT2



Figura 16 - GT2 (ampliação por MEV em 30 vezes)



- Geomembrana texturizada comercial 03, chamada de GT3 (Figura 15 e Figura 16);

Figura 17 - Geomembrana texturizada 03 - GT3

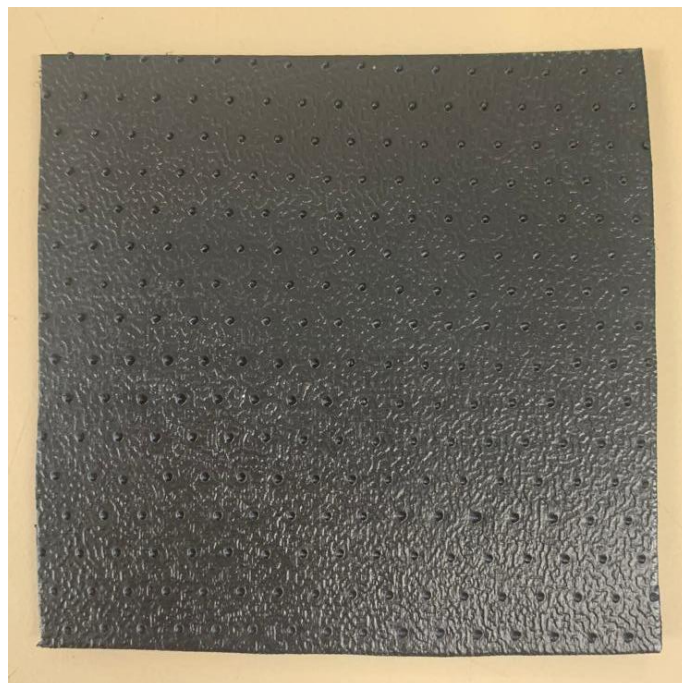
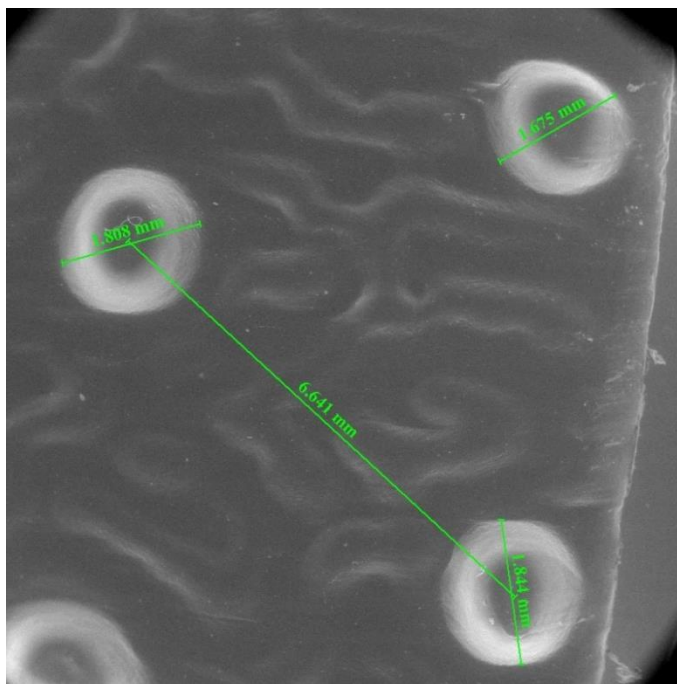


Figura 18 - GT3 (ampliação por MEV em 30 vezes)



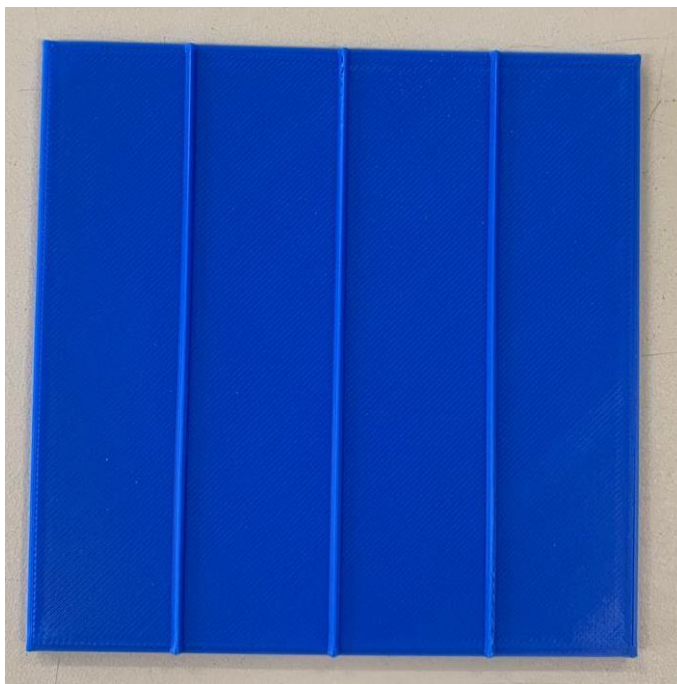
- Geomembrana impressa 3D lisa, que foi chamada de GIL (Figura 17);

Figura 19 - Geomembrana impressa lisa – GIL



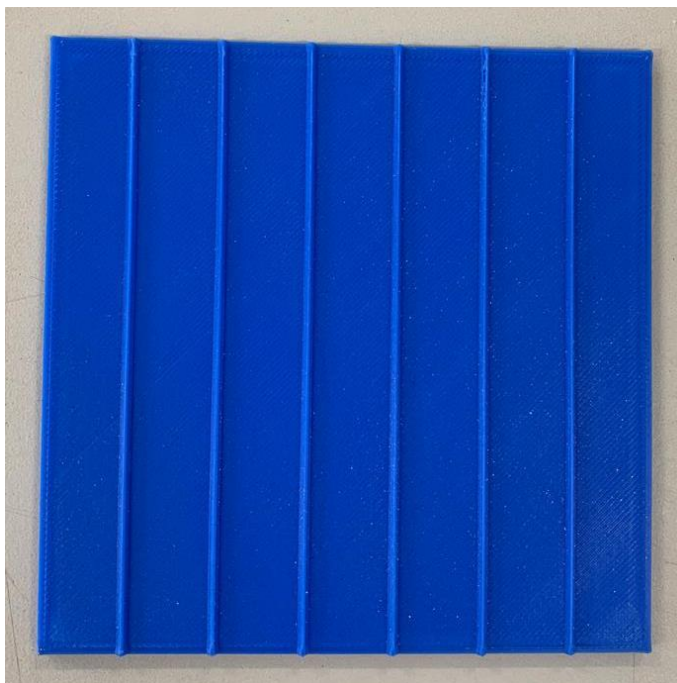
- Geomembrana impressa 3D texturizada com 3 ranhuras, que foi chamada de GI3 (Figura 18);

Figura 20 - Geomembrana impressa com 3 ranhuras - GI3



- Geomembrana impressa 3D texturizada com 6 ranhuras, que foi chamada de GI6 (Figura 19);

Figura 21 - Geomembrana impressa com 6 ranhuras - GI6



- Geomembrana impressa 3D texturizada com 9 ranhuras, que foi chamada de GI9 (Figura 20);

Figura 22 - Geomembrana impressa com 9 ranhuras - GI9



- Geomembrana impressa 3D texturizada com 12 ranhuras, que foi chamada de GI12 (Figura 21).

Figura 23 - Geomembrana impressa com 12 ranhuras - GI12



As principais propriedades das geomembranas comerciais estão na Tabela 1. Estas propriedades foram fornecidas pelos catálogos dos próprios fabricantes de cada material utilizado nesta pesquisa.

Tabela 1 - Propriedades das geomembranas comerciais

Propriedade	Norma	GL	GT1A	GT1F	GT2	GT3
Espessura nominal (mm)	ASTM D5199	1,5	2,0	2,0	2,5	2,0
Densidade (g/cm ³)	ASTM D0792	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Tração – escoamento (kN/m)	ASTM D6693	22	29	29	37	29
Tração – ruptura (kN/m)	ASTM D6693	40	21	21	26	21
Puncionamento (N)	ASTM D4833	480	534	534	667	534
Resistência ao rasgo (N)	ASTM D1004	187	249	249	311	249

Fonte: Os fabricantes.

Salienta-se que a geomembrana GT1 possui dois lados texturizados designados por GT1A e GT1F, em que a diferença está no padrão de distribuição das rugosidades.

Na Tabela 2 estão as medidas de espessura do núcleo e altura de aspereza das geomembranas utilizadas, medidas estas verificadas pelo Laboratório de Geossintéticos (LabGeo/UFSCar). Para estes ensaios foi utilizada a norma ASTM D5994 para a determinação da espessura do núcleo da geomembrana e a norma ASTM D 7466 para a determinação da altura de aspereza de geomembranas texturizadas.

Tabela 2 - Espessura e altura de aspereza das geomembranas

Geomembranas	Espessura do núcleo (mm)*	Desvio padrão das medidas de espessura do núcleo	Média da altura de aspereza (mm)*	Desvio padrão das medidas de altura de aspereza
GL	1,444	0,021	-	-
GT1A	1,570	0,099	0,550	0,140
GT1F	1,680	0,186	0,808	0,138
GT2	1,996	0,020	1,124	0,026
GT3	2,172	0,052	1,034	0,103
GIL	2,658	0,025	-	-
GI3	2,618	0,020	0,132	0,035
GI6	2,622	0,037	0,996	0,015
GI9	2,642	0,031	0,986	0,024

GI12	2,612	0,048	1,028	0,050
------	-------	-------	-------	-------

* Média de cinco medidas.

Fonte: A autora.

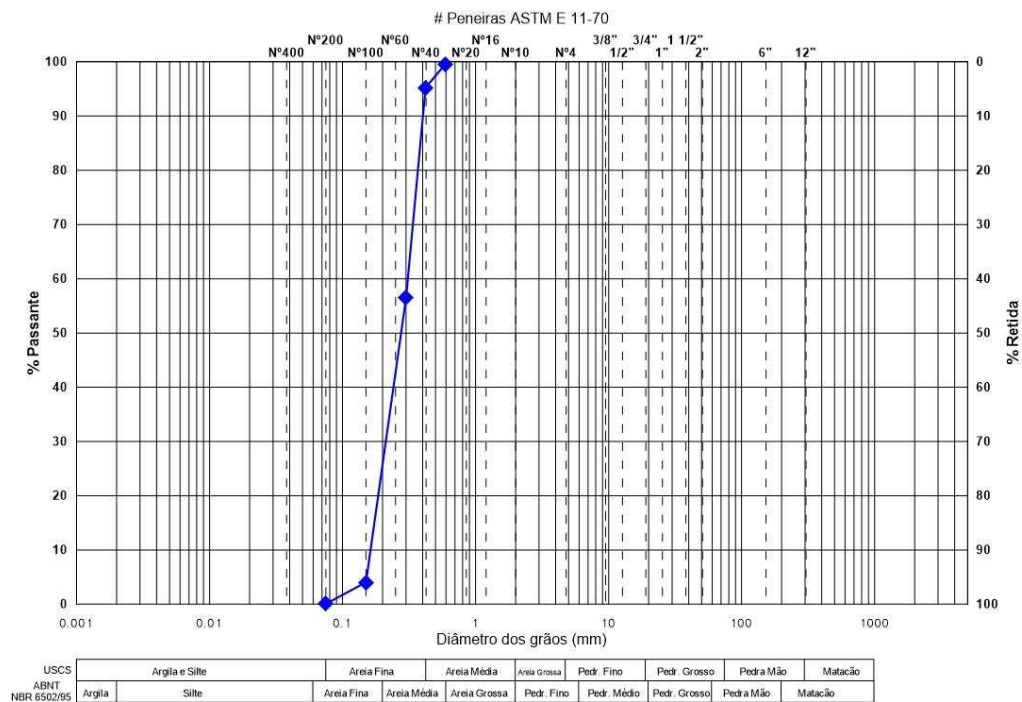
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA UTILIZADA

A areia utilizada na pesquisa é da praia de São Francisco, em Niterói, no estado do Rio de Janeiro. Essa areia já foi caracterizada e estudada em alguns outros trabalhos, como, por exemplo, Penasso (2022), Rodrigues (2020), Riccio (2001) e Oliveira Filho (1987).

De acordo com os dados obtidos pela pesquisa de Oliveira Filho (1987), a areia é composta por minerais de quartzo incolor, branco leitoso, amarelo e incolor, com incrustações escuras, com pequenas frações de mica biotita do tipo lamelar amarela e marrom e minerais escuros, como hematita e lecoxênio. Em relação ao formato dos grãos, há uma variação de subarredondado a subangular, com alongamento médio menor que 1,5.

O solo possui 95,16% de areia fina, 4,75% de areia média e 0,07% de finos, sendo texturalmente classificado como areia fina com vestígio de areia média e finos (Rodrigues, 2020). A curva granulométrica é apresentada na Figura 24, em que a areia é considerada mal graduada e muito uniforme, com CNU (coeficiente de não uniformidade) igual a 1,7 e CC (coeficiente de curvatura) igual a 0,9. A densidade real da areia (ρ_s) é 2,652 g/cm³, o índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$) é 0,86 e o índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín}}$) é 0,53. O diâmetro médio das partículas (d_{50}) é igual a 0,3mm.

Figura 24 - Curva Granulométrica da areia



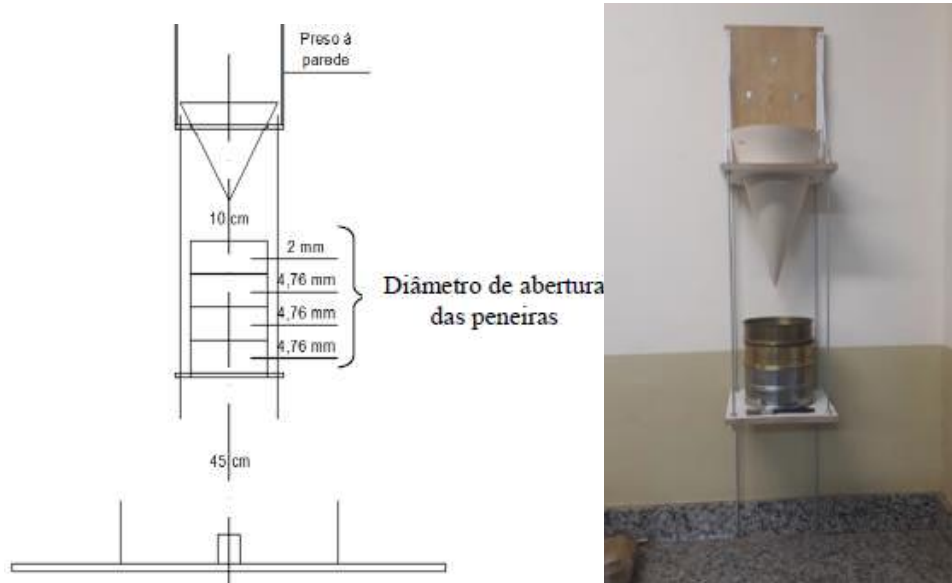
Fonte: Rodrigues (2020)

3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Primeiramente, a amostra de areia foi preparada por um processo de peneiramento com o objetivo de retirar o material orgânico grosseiro e impurezas, e também passou por um processo de lavagem para a retirada do sal. O procedimento de lavagem passou por um período de repouso da areia na água por 24h, seguido de secagem na estufa. O procedimento foi feito duas vezes, sendo assim possível o início do ensaio propriamente dito. O material inservível foi separado, utilizando-se a peneira de abertura de 2,0mm.

A preparação dos corpos de prova foi feita em uma caixa de cisalhamento direto de 10cmx10cm que foi posicionada embaixo de um pluviador criado por Ribeiro e Riccio (2019), que permite o controle da densidade relativa (DR), deixando a DR = 100% (areia compacta). Este pluviador se baseia no modelo de Miura e Toki (1982). De acordo com os estudos destes autores, para o alcance dessa DR de 100%, o funil recomendado é o de diâmetro de 5mm. A Figura 25 apresenta o esquema e o pluviador utilizado para a moldagem dos corpos de prova.

Figura 25 - Esquema com pluviador de areia



Fonte: Ribeiro e Riccio (2019)

A Figura 26, a seguir, apresenta esse processo de pluviação da areia na caixa de cisalhamento.

Figura 26 - Pluviação da areia



Na Figura 27, é possível visualizar, em destaque, como a caixa de cisalhamento direto fica centralizada durante o processo de pluviação.

Figura 27 - Caixa de cisalhamento direto sendo preenchida por areia



Após esse processo, o ensaio foi realizado no equipamento de cisalhamento direto, no LEEMS (Laboratório de Ensaio Especial em Mecânica dos Solos) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). A Figura 28 apresenta o equipamento utilizado para o ensaio em questão.

Figura 28 - Equipamento de Cisalhamento Direto

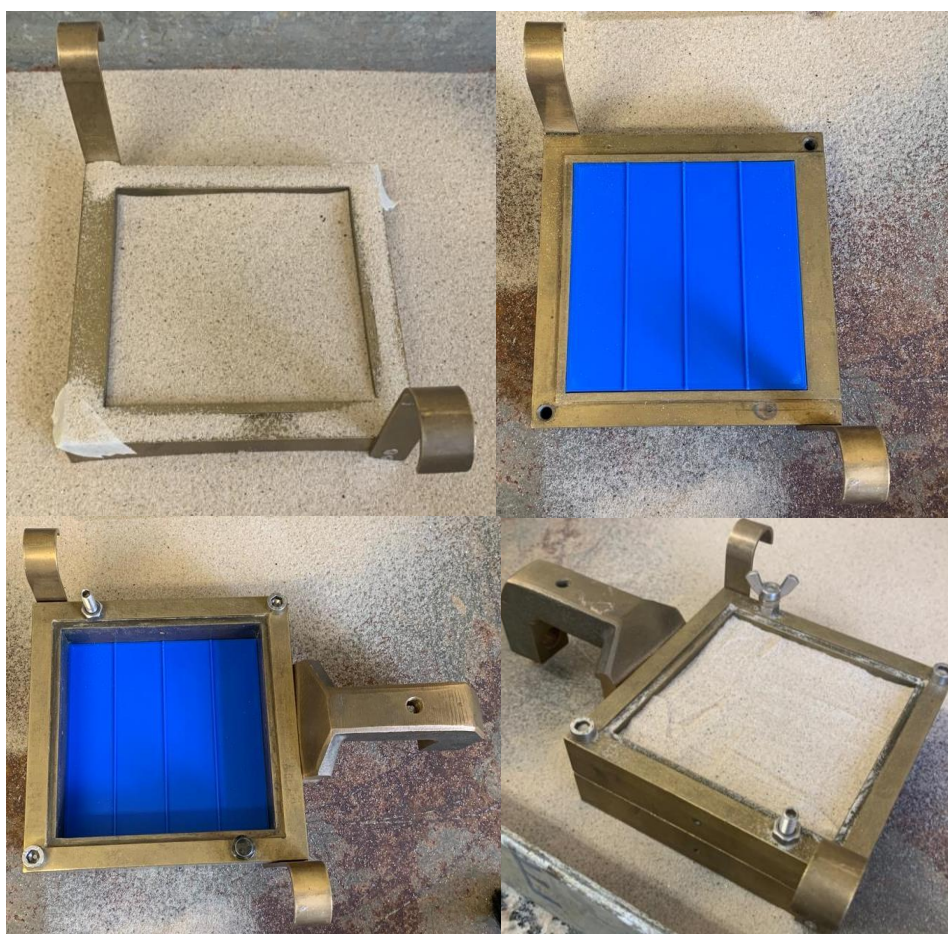


Como a pesquisa envolve um solo arenoso na condição seca, e trata-se de uma areia pura, não houve a necessidade de um adensamento, sendo necessário somente uma acomodação inicial do corpo de prova até que as deformações verticais se estabilizassem. Considerando que essas deformações são praticamente instantâneas, adotou-se um tempo de 5min para essa acomodação em todos os ensaios.

A velocidade de cisalhamento foi adotada como 0,08mm/min. Esse valor foi obtido em um estudo feito por Rodrigues (2020) de acordo com critérios estabelecidos pela norma ASTM D3080/D3080M (ASTM, 2014).

Para a realização dos ensaios com as geomembranas, é importante destacar que a geomembrana foi posicionada após a parte de baixo da caixa de cisalhamento ser totalmente preenchida com a areia. O geossintético foi colocado sobre a areia com a textura voltada para cima, conforme Figura 29, e, em seguida, a parte de cima da caixa foi acoplada e a areia foi colocada sobre a geomembrana até completar totalmente a caixa.

Figura 29 - Posicionamento da geomembrana na caixa de cisalhamento



Esses ensaios de cisalhamento direto foram realizados de acordo com a norma ASTM D5321/D5321 M (ASTM, 2021), que é o método de ensaio padrão para determinação de resistência ao cisalhamento de interfaces solo-geossintético e geossintético-geossintético por cisalhamento direto. Vale destacar que, como a areia é um material que apresenta pouco deslocamento vertical, é segura a utilização do próprio solo como substrato do corpo de prova.

Além disso, um substrato rígido como placa de madeira ou metal pode não simular as condições reais com a mesma precisão que o uso do substrato de solo.

Para o caso de ensaios na areia pura, foi utilizada a norma ASTM D3080-11 (ASTM, 2020).

O programa de ensaios contou com as seguintes configurações e especificações apresentadas no Quadro 1, sendo, ao todo, 11 envoltórias de resistência ao cisalhamento e 44 ensaios realizados.

Quadro 1 - Programa de ensaios de Cisalhamento Direto

Configuração	Código do ensaio	Tensões normais (kPa)	Areia	Abertura do funil (mm)	Densidade relativa DR (%)
Areia pura	AP	37,5/75/150/300	São Francisco Niterói/RJ	5	100
Areia – geomembrana lisa	GL				
Areia – geomembrana texturizada 01 (lado aberto)	GT1A				
Areia – geomembrana texturizada 01 (lado fechado)	GT1F				
Areia – geomembrana texturizada 02	GT2				
Areia- geomembrana texturizada 03	GT3				
Areia – geomembrana impressa lisa	GIL				
Areia – geomembrana impressa com 3 ranhuras	GI3				
Areia – geomembrana impressa com 6 ranhuras	GI6				
Areia – geomembrana impressa com 9 ranhuras	GI9				
Areia – Geomembrana impressa com 12 ranhuras	GI12				

Os dados de cisalhamento direto serão utilizados para a elaboração das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal relativo e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal relativo. Além disso, as envoltórias de resistência ao cisalhamento de

pico e residual serão traçadas pelo critério de Coulomb e os cálculos serão feitos a partir da área corrigida e da tensão normal corrigida, conforme orientação da norma ASTM D5321.

É importante destacar que serão apresentadas envoltórias secantes, com o objetivo de avaliar o comportamento de interface para cada tensão normal aplicada, sem considerar a média produzida pela envoltória. Dessa forma, é possível fazer uma análise separada do ângulo de atrito e da adesão para cada tensão normal aplicada.

Para a análise residual, serão utilizados os últimos pontos das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, pois, assim, estará sendo feita uma associação ao deslocamento máximo.

Além disso, a eficiência das geomembranas impressas será avaliada a partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto em comparação com as geomembranas comerciais já existentes. E ao final do trabalho, no capítulo de comparação de resultados entre interfaces, serão feitas diversas comparações dos resultados, considerando as envoltórias de pico e residuais, com o objetivo de se avaliar a eficiência de cada interface e relacionar os melhores modelos de texturas e espaçamentos em questão.

Através do critério de Coulomb, é possível calcular a tensão cisalhante em função da tensão normal aplicada, da coesão (ou adesão para os casos de interface) e do ângulo de atrito. A partir disso, é feita uma relação entre a tensão cisalhante de cada interface em comparação com a tensão cisalhante da areia pura, para que seja possível avaliar o ganho ou não de resistência em cada modelo (Quadro 2). A tensão cisalhante é calculada pela Equação 1 a seguir:

$$\tau = a + \sigma \cdot \text{tg}(\phi) \quad (1)$$

Onde:

- a) τ : tensão cisalhante;
- b) a : adesão;
- c) σ : tensão normal aplicada;
- d) ϕ : ângulo de atrito.

Além disso, será calculado o ângulo de dilatância (ψ) para cada interface com o objetivo de quantificar a contribuição da variação volumétrica para a resistência ao cisalhamento, permitindo avaliar o grau de intertravamento mecânico entre os grãos de areia e a superfície da geomembrana. Valores mais elevados de ψ indicam maior mobilização de dilatância e, portanto,

maior participação do engrenamento mecânico na resistência de pico, enquanto valores reduzidos ou próximos de zero sugerem comportamento predominantemente friccional, com menor contribuição volumétrica e tendência ao regime próximo ao estado crítico (Taylor, 1948; Rowe, 1962).

O efeito da dilatação em função do ângulo de dilatância (Ψ) pode ser calculado pela Equação 2, (BOLTON, 1986).

$$\Delta\phi_{\text{dilatação}} = \phi_p - \phi_r = 0,8 \times \Psi \quad (2)$$

Onde: ϕ_p = ângulo de atrito de pico, ϕ_r = ângulo de atrito residual.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS

Para a caracterização das geomembranas, foram realizados ensaios de microscopia eletrônica. Este ensaio envolve a utilização de microscópios eletrônicos que examinam a estrutura do material em alta resolução, permitindo a análise da superfície de geomembranas através do uso de imagens. Essas imagens são importantes, pois permitem analisar, em geomembranas lisas, possíveis imperfeições, microfissuras ou ondulações, e em geomembranas texturizadas, a uniformidade e distribuição das texturas, que influenciam na aderência ao solo.

Além disso, foram feitas medições, com paquímetro, das alturas de asperezas nas geomembranas GT2 e GT3. Estas medidas foram utilizadas para auxiliar na elaboração dos modelos impressos em 3D.

3.5 CRIAÇÃO DE MODELOS DE GEOMEMBRANAS EM IMPRESSORAS 3D

Ao final do trabalho, foram criados cinco novos modelos de geomembranas, sendo uma lisa e quatro com texturas diferentes entre cada modelo. Os parâmetros adesão e ângulo de atrito obtidos a partir dos ensaios nestes modelos impressos foram comparados com os mesmos parâmetros obtidos nas geomembranas comerciais.

Para a criação desses novos modelos de geomembranas, foram utilizados os recursos da manufatura aditiva, conhecida como impressão 3D. Essa tecnologia permite a criação de objetos a partir de arquivos digitais (Camacho et al., 2018).

Com os resultados dos ensaios das geomembranas existentes, foram propostos novos modelos e foram feitos, através de modelagem computacional, desenhos e especificações das novas geomembranas pelo *software Onshape* (Figura 30). A impressão realizada foi feita pela

impressora 3D *Kyood3D Tycoon Slim* (Figura 31). O material utilizado para a impressão dos modelos foi o filamento de PLA, que é um material plástico de ácido polilático de grande facilidade e aplicabilidade para impressões 3D.

O Políácido Lático (PLA) é um poliéster alifático derivado de fontes renováveis, considerado uma alternativa sustentável aos polímeros convencionais de origem petroquímica. Além disso, apresenta boa rigidez, facilidade de processamento e compatibilidade com diferentes técnicas de fabricação, especialmente a impressão 3D, o que tem ampliado sua utilização em aplicações industriais, biomédicas e de pesquisa. (Farah, Anderson e Langer, 2016).

Figura 30 - Desenvolvimento das geomembranas impressas pelo software

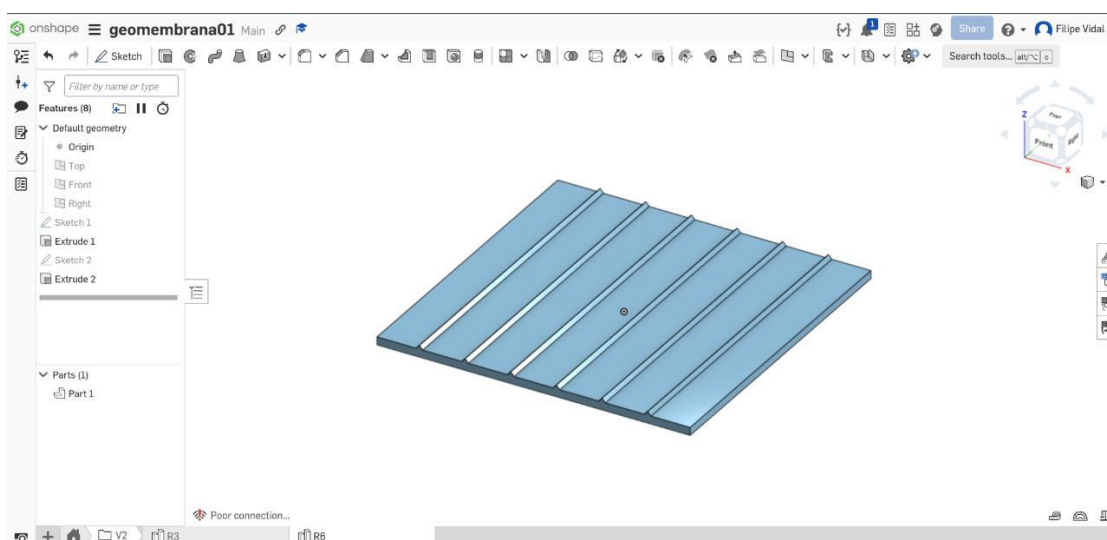
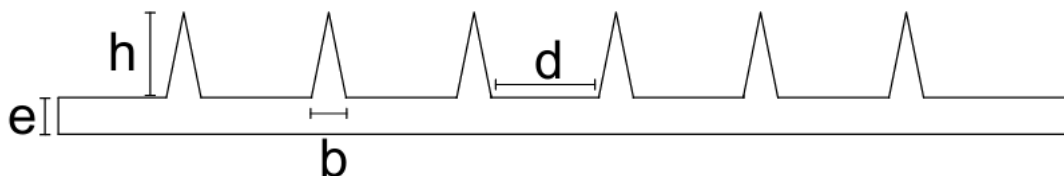


Figura 31 - Impressora 3D Kyood3D Tycoon Slim



Para a realização destes desenhos, foram analisadas as dimensões das geomembranas comerciais GT2 e GT3, considerando a altura da aspereza e a distância entre as rugosidades, conforme o esquema da Figura 32.

Figura 32 - Esquema de aspereza de uma geomembrana



Para isso, tem-se as seguintes medidas para avaliação:

- a) e: espessura da geomembrana;
- b) d: distância entre as asperezas;
- c) b: base de cada aspereza;
- d) h: altura de aspereza.

A proposta é fazer modelos de textura compatíveis com a matriz plana, por isso foram feitas comparações com as geomembranas texturizadas 02 e 03, que possuem texturas distribuídas de forma uniforme e ordenada. Foram feitas 10 medições, através de um paquímetro, de cada parâmetro, e obteve-se uma média para uma especificação mais precisa. Esses valores estão na Tabela 3, e os desvios padrões de cada medida estão na Tabela 4.

Tabela 3 – Média das medidas das asperezas de duas geomembranas comerciais.

Especificação	GT2 (mm)	GT3 (mm)
D	5,4	5,5
B	1,5	1,3
H	1,2	1,0

Tabela 4 - Desvios padrões das medidas

Especificação	GT2 (mm)	GT3 (mm)
D	0,045	0,027
B	0,034	0,020
H	0,026	0,013

As medidas de espessura (e), distância entre as asperezas (d), base de aspereza (b) e altura de aspereza (h) das geomembranas texturizadas estão na Tabela 5.

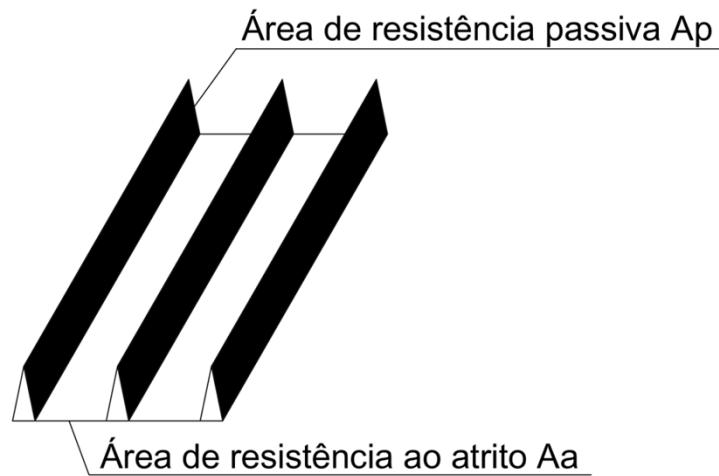
Tabela 5 - Medidas das geomembranas comerciais e impressas em 3D.

Geomembranas	Dimensões (mm)			
	E	D	b	h
GT1A	2.0	*	*	*
GT1F	2.0	*	*	*
GT2	2.2	5.4	1.5	1.2
GT3	2.3	5.5	1.3	1.0
GI3	2.5	23.4	2.1	1.2
GI6	2.5	12.5	2.1	1.2
GI9	2.5	8.1	2.1	1.2
GI12	2.5	5.8	2.1	1.2

Nota: os valores relativos às geomembranas impressas 3D referem-se aos valores de projeto. Pequena divergência se observa entre projeto e o efetivamente impresso, conforme mostrado na Tabela 2.

No momento do ensaio de resistência ao cisalhamento, a geomembrana apresenta uma força resultante em oposição ao movimento relativo ao solo-geomembrana. Esta força é composta das parcelas de resistência passiva (F_p) e de atrito superficial (F_{at}). A parcela de resistência passiva atua na parede da aspereza, enquanto a parcela de resistência ao atrito atua na superfície da geomembrana. Por isso, a variação da quantidade de aspereza e os espaços entre cada uma terão impacto direto na resistência ao cisalhamento. Esta relação pode ser visualizada no esquema a seguir (Figura 33).

Figura 33 - Áreas de influência da resistência



De acordo com Pinto (2006), e baseado em teorias clássicas formuladas por Rankine (1857) e Coulomb (1776), chegou-se às seguintes equações abaixo para uma indicação da parcela de contribuição relativa de cada parcela da geomembrana. Isto é importante, porque quanto maior for a força resultante, maior será a resistência ao cisalhamento em questão, e menor será a tendência ao deslizamento da geomembrana. Seguem as Equações 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9:

$$F = \sigma \cdot A \quad (3)$$

$$\sigma'_h = k \cdot \sigma'_v = k_p \cdot \sigma'_v \quad (4)$$

$$k_p = \tan^2(45 + \phi/2); \quad (5)$$

$$F_1 = \sigma'_h \cdot A_p = k_p \cdot \sigma'_v \cdot A_p \quad (6)$$

$$F_2 = \mu \cdot N = \tan \delta \cdot N \quad (7)$$

$$N = \sigma'_v \cdot A_a \quad (8)$$

$$F_2 = \tan \delta \cdot \sigma'_v \cdot A_a \quad (9)$$

Onde:

- a) F: força; F₁: força da parcela passiva (parede da rugosidade); F₂: força da parcela de atrito (superfície da geomembrana);
- b) σ : tensão; σ'_h : tensão efetiva horizontal; σ'_v : tensão efetiva vertical;
- c) A: área; A_p: área passiva; A_a: área de atrito;
- d) k: coeficiente de empuxo; k_p: coeficiente de empuxo passivo;
- e) N: força normal.

A partir disso, a força resultante será conforme as Equações 8 e 9:

$$FR = F_1 + F_2 = (k_p \cdot \sigma'_v \cdot A_p) + (\tan \delta \cdot \sigma'_v \cdot A_a) \quad (8)$$

$$FR = \sigma'_v (k_p \cdot A_p + \tan \delta \cdot A_a) \quad (9)$$

De acordo com as forças resultantes da resistência ao cisalhamento, é possível identificar que a maior parcela está no que foi chamado de força 01, em que se tem o coeficiente de condição passiva (K_p). Por isso, pretende-se variar a área correspondente desta parcela e verificar qual é a condição ideal para o ganho máximo de resistência.

A seguir, seguem-se dois exemplos que ilustram esta maior contribuição da força 01 para o aumento de resistência:

- a) Exemplo 01: Para a areia pura com tensão normal aplicada de 75kPa, o ângulo de atrito foi: $\phi = 45^\circ$.

$$FR = \sigma'_v (k_p \cdot A_p + \tan \phi \cdot A_a) \quad (9)$$

$$FR = 75 (\tan^2(45 + \phi/2) \cdot A_p + \tan \phi \cdot A_a) = 75 (\tan^2(45 + 22,5) \cdot A_p + \tan 45 \cdot A_a) \\ = \mathbf{75 (5,83 \cdot A_p + 1 \cdot A_a)}.$$

Ou seja, o aumento da área passiva representará um maior ganho na força resultante que resiste ao cisalhamento, pois a área passiva é multiplicada por 5,83 vezes a mais do que a área ativa.

- b) Exemplo 02: Para a areia pura com tensão normal aplicada de 300kPa, o ângulo de atrito foi: $\phi = 42^\circ$.

$$FR = \sigma'_v (k_p \cdot A_p + \tan \phi \cdot A_a) \quad (9)$$

$$FR = 300 (\tan^2(45 + \phi/2) \cdot A_p + \tan \phi \cdot A_a) = 300 (\tan^2(45 + 21) \cdot A_p + \tan 42 \cdot A_a) \\ = \mathbf{75 (5,04 \cdot A_p + 0,9 \cdot A_a)}.$$

Neste exemplo, percebe-se também a maior contribuição da área passiva para o aumento do valor da força resultante. Os resultados de ensaios de cisalhamento na interface areia-geomembrana apresentados no próximo capítulo mostram que há um intercepto de adesão aparente no eixo Y da envoltória de resistência ao cisalhamento. Esta adesão aparente resulta das forças passivas desenvolvidas na interface devido às asperidades, que ao propiciar resistência passiva ao deslocamento relativo solo-geomembrana provoca o surgimento de forças passivas resistentes.

Dessa forma, os novos modelos foram testados, por meio de ensaios de cisalhamento direto, para fins de comparação entre as geomembranas impressas 3D as geomembranas comerciais e ainda a comparação de desempenho entre as próprias geomembranas impressas. As geomembranas lisas, tanto as comerciais quanto as impressas, foram importantes para se quantificar o ganho de resistência ao cisalhamento, traduzido pela tensão cisalhante, gerado pelas rugosidades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos em termos de resistência ao cisalhamento e variação de volume para a areia pura e interfaces areia-geomembrana, contemplando os geossintéticos comerciais (GL, GT1A, GT1F, GT2 e GT3) e as geomembranas impressas em impressora 3D (GIL, GI3, GI6, GI9 e GI12).

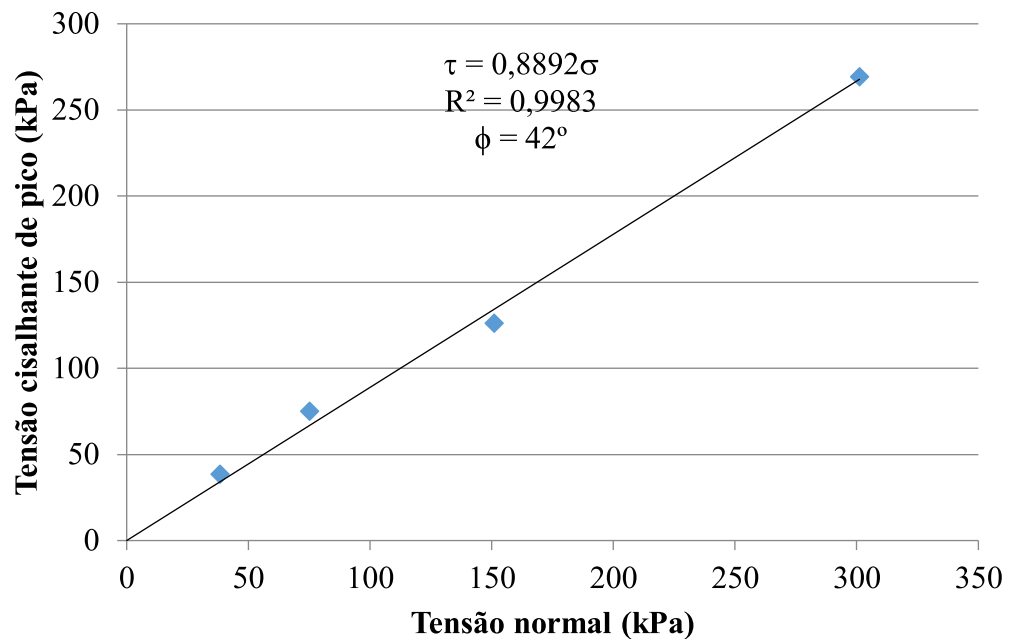
Para a análise de interação com as geomembranas, serão apresentados resultados em termos de ângulo de atrito de interface, referente a interação da areia com as geomembranas, e resultados de adesão como um intercepto coesivo por conta das texturas, neste trabalho, a adesão será denominada como uma adesão aparente.

4.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA AREIA PURA - AP

A areia pura (AP) apresentou um comportamento em termos de resistência ao cisalhamento que era esperado de acordo com a literatura e trabalhos anteriores que envolveram esse mesmo tipo de solo, como Penasso (2022), Rodrigues (2020), Riccio (2001) e Oliveira Filho (1987).

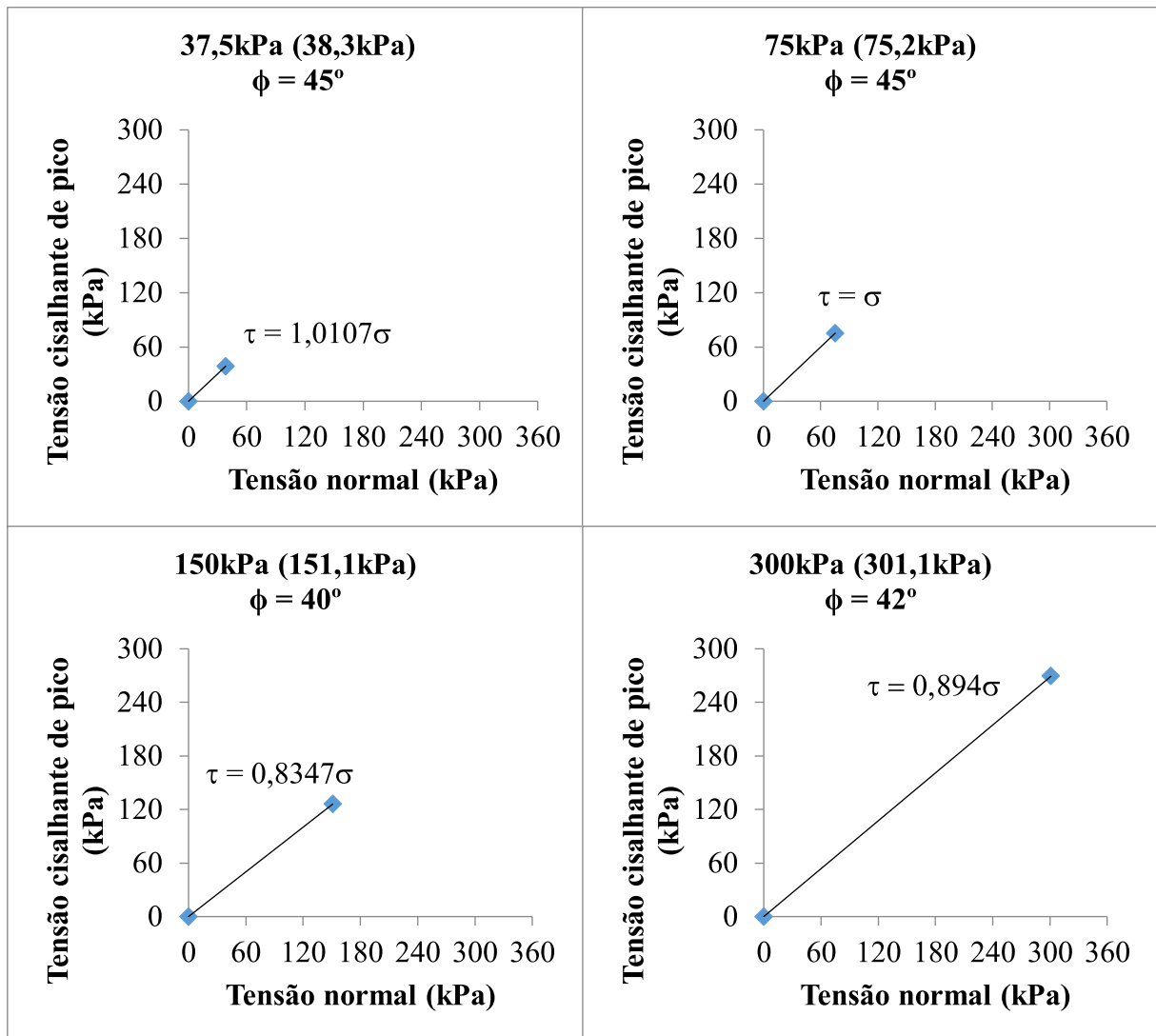
Com a correção da tensão normal (σ) e passando a reta pela origem, obteve-se um ângulo de atrito de pico (ϕ_p) de 42° e uma coesão (c) igual a zero. Na Figura 34, é possível observar a envoltória de resistência ao cisalhamento de pico, considerando as tensões normais corrigidas. Os ensaios foram executados para as tensões normais iniciais de 37,5kPa, 75kPa, 150kPa e 300kPa.

Figura 34 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico – AP



É importante destacar que os ângulos de atrito secantes permitem avaliar a variação da resistência ao cisalhamento ao longo da envoltória, sem que ocorra uma superestimação ou subestimação dos valores, pois a envoltória ajustada do ângulo de atrito de pico representa um valor médio de ângulo de atrito (Hosseini; Jesmani, 2014). Para esta análise, os ângulos de atrito secantes apresentaram algumas variações, considerando-se a reta secante para cada ponto de tensão normal aplicada. A Figura 35 ilustra essa diferenciação dos ângulos de atrito secantes e indica que, para as tensões normais aplicadas mais baixas, como 37,5 e 75kPa, ocorreu um aumento do ângulo de atrito em comparação com a envoltória, o que representa uma melhor resistência da interface para tensões mais baixas.

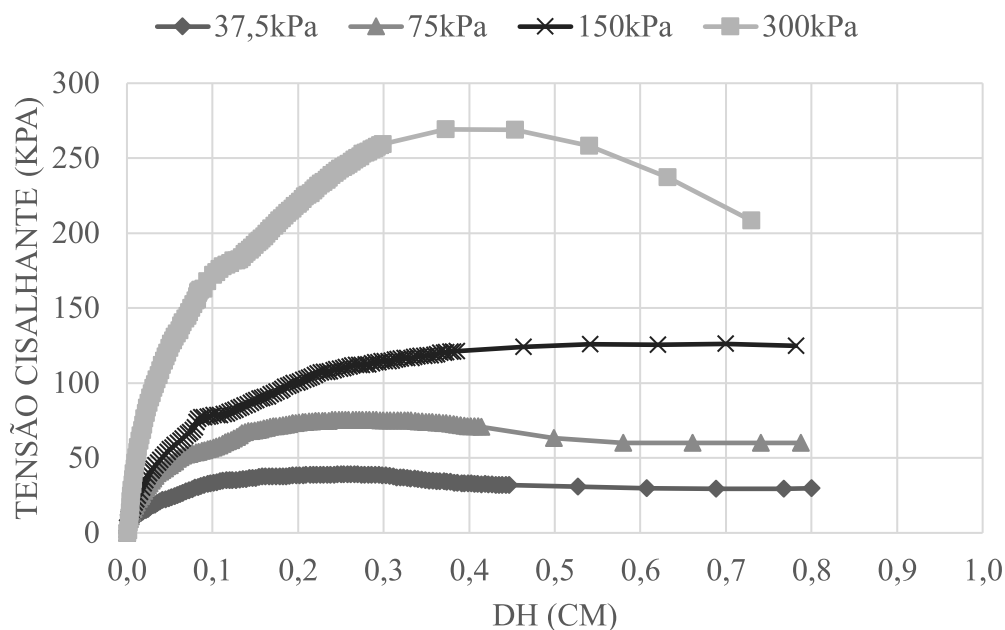
Figura 35 - Ângulos de atrito secantes de pico - AP



Nota: As tensões normais entre parênteses são as tensões corrigidas pela área.

Outro fator relevante para essa análise está relacionado à variação da tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal (Dh), observada na Figura 36. Essas curvas indicam que, para a tensão mais alta de 300kPa, há um pico bem definido da resistência ao cisalhamento, seguido de uma queda significativa, característica de um comportamento frágil. Já para as tensões menores, não ocorre uma queda acentuada, o que indica um comportamento mais dúctil do solo, refletindo uma mobilização progressiva da resistência. Estudos, como de Muluti et al., (2023), ilustram que tensões normais maiores favorecem a ocorrência de picos de resistência mais definidos e ruptura sob menores deslocamentos relativos, enquanto menores níveis de tensão conduzem a uma ruptura mais gradual.

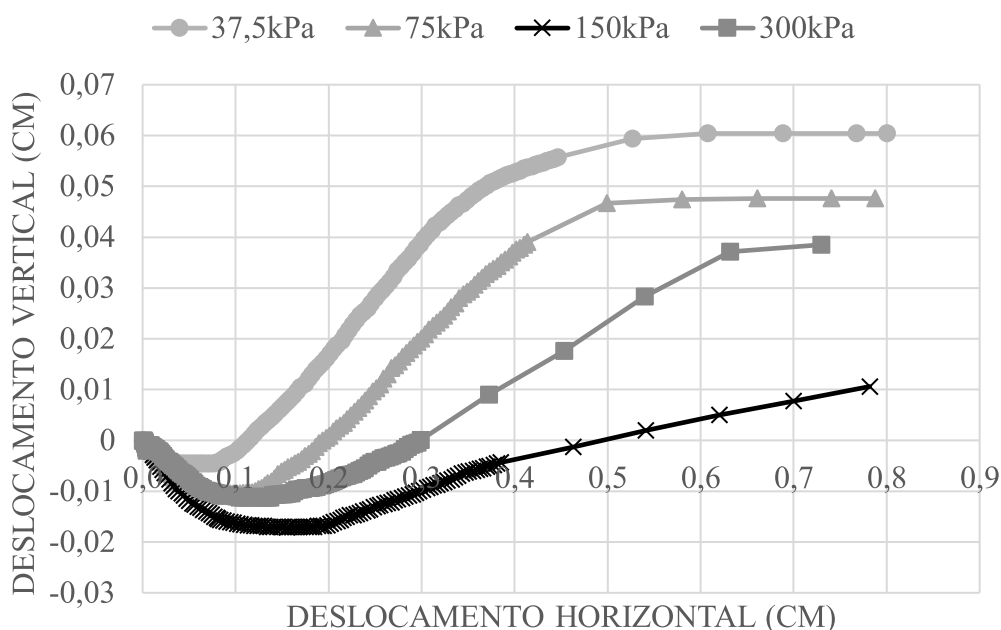
Figura 36 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) – AP



O gráfico da Figura 37 apresenta as curvas de deslocamento vertical (D_v) versus deslocamento horizontal (D_h) dos corpos de provas de areia pura ensaiados. Pode-se observar que ocorre uma contração no início do ensaio, seguida de uma expansão, ou seja, uma tendência de aumento de volume antes de atingir a condição de pico e ruptura. De acordo com Mitchel e Soga (2005), esse aumento de volume é denominado dilatância e esse comportamento é característico de areias compactas. A dilatância provoca um aumento no ângulo de atrito de pico, e a inserção das geomembranas pode provocar um comportamento diferenciado da interface areia pura - geomembrana em relação ao aumento de volume.

Cabe ressaltar que a dilatância, ao aumentar a tensão efetiva vertical, contribui para o aumento de resistência por atrito de superfície, uma vez que a força de atrito é proporcional à força normal agindo no plano de interface (Wood, 2014).

Figura 37 – Dv (cm) versus Dh (cm) – AP



A Figura 38 apresenta a envoltória de resistência residual da areia, cujo ângulo de atrito (ϕ_r) corresponde a 36° . Esta resistência é referente ao comportamento do solo após o pico e ruptura, sendo interessante a sua análise pois serve como indicador da resistência ao cisalhamento mobilizada na condição de grandes deslocamentos ou mesmo na condição de deslizamento (Fang et al., 2020).

Em seguida, na Figura 39, são apresentadas as variações de ângulo de atrito secante, considerando a condição de resistência ao cisalhamento residual. Pode-se observar que o ângulo de atrito sofre uma diminuição apenas para a tensão normal aplicada inicial de 300kPa. Isso traz uma reflexão de que, para uma tensão mais alta, o ângulo de atrito, na condição residual, foi menor pela análise secante em comparação com a envoltória.

Figura 38 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual - AP

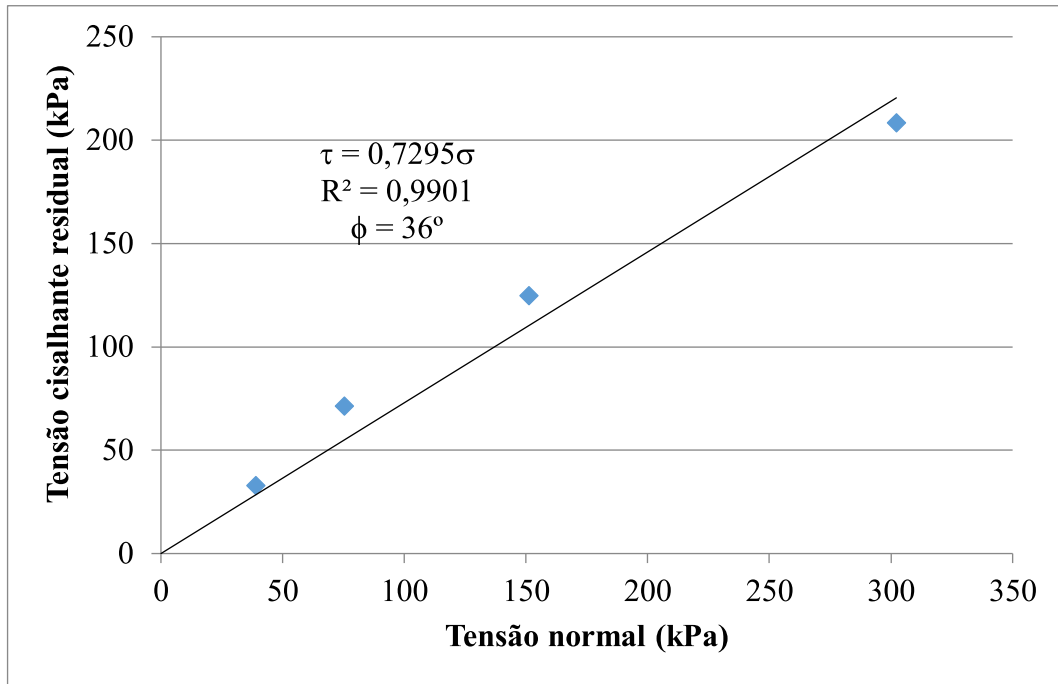
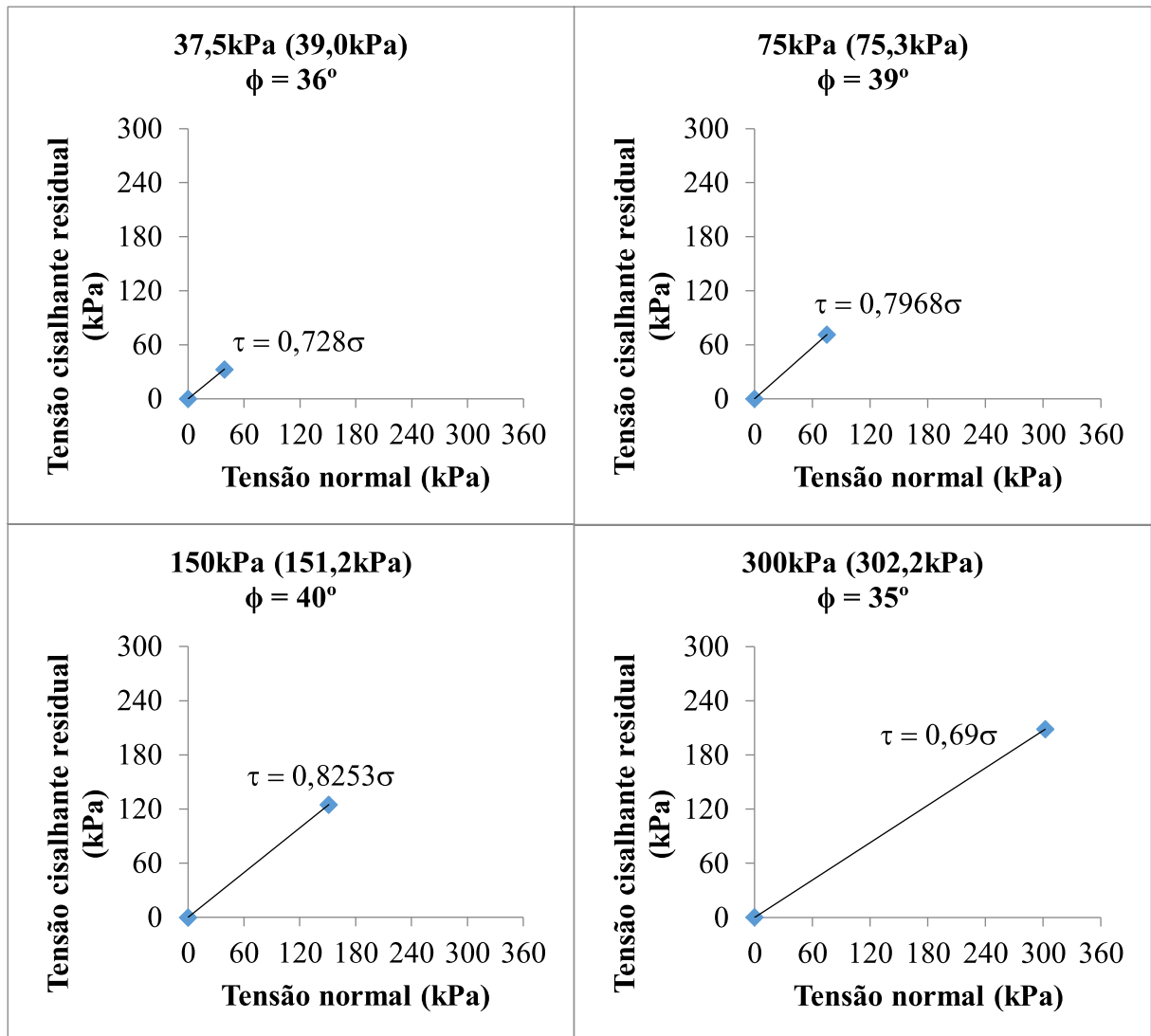


Figura 39 - Ângulos de atritos secantes residuais - AP

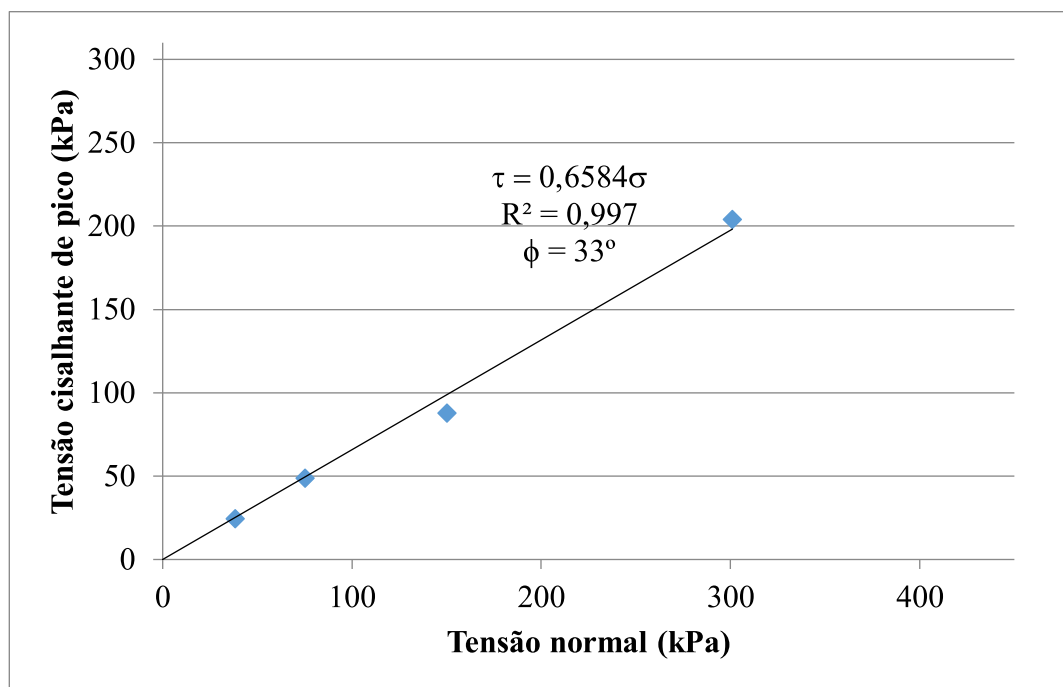


Nota: As tensões normais entre parênteses são as tensões corrigidas pela área.

4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA LISA - GL

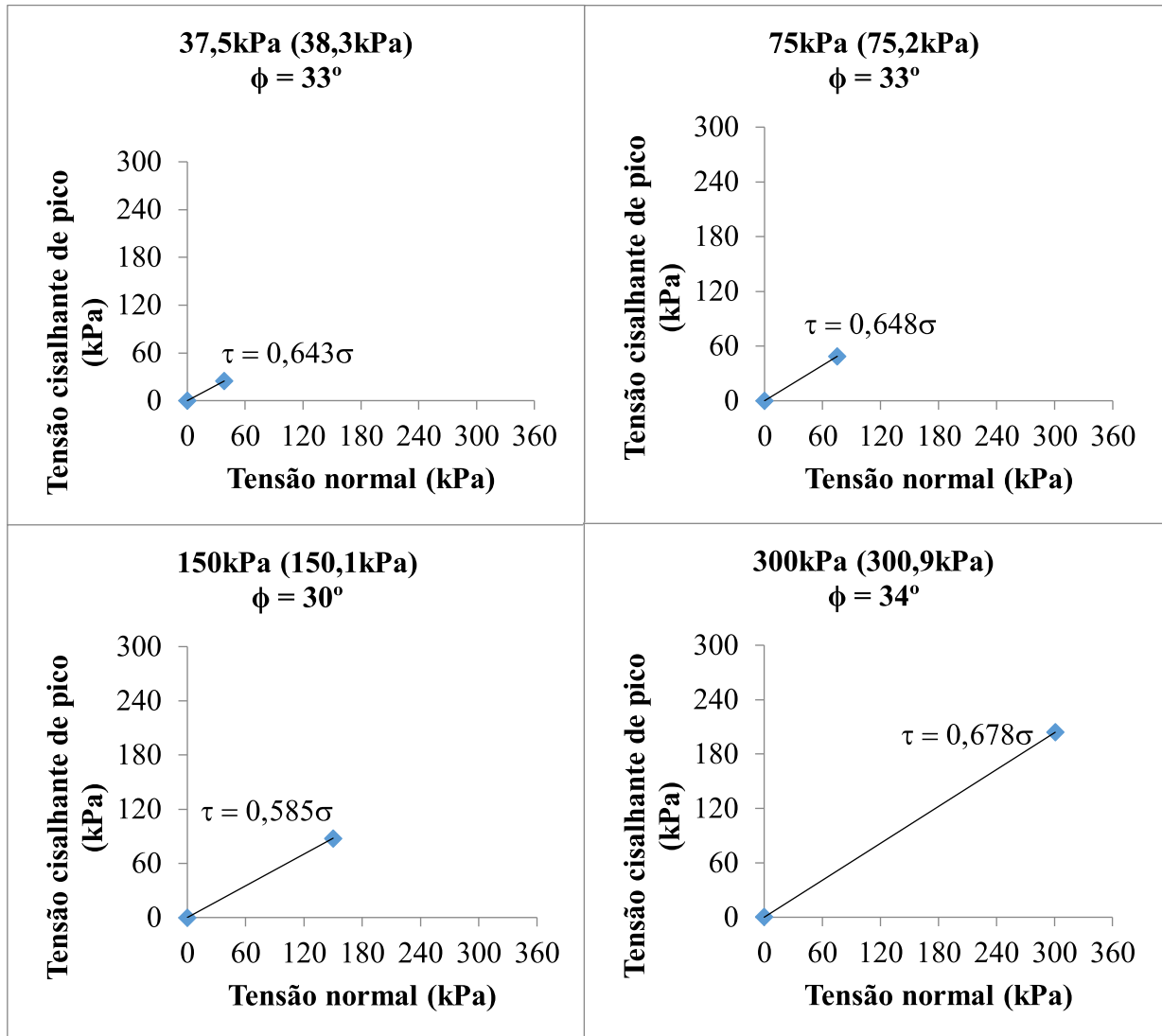
A interface areia-geomembrana comercial lisa (GL) apresentou resultados de resistência ao cisalhamento condizentes com o esperado de acordo com a literatura (Feng;Yang, 2024; Adeleke et al., 2021; Sánchez, 2018), pois apresentou valores inferiores de ângulo de atrito em comparação com a areia pura e também com as interfaces de areia e geomembranas texturizadas. A utilização da geomembrana fez com que o ângulo de atrito de pico resultasse em um valor de $\phi_p = 33^\circ$, e a coesão aparente, aqui tratada como adesão, manteve-se nula. A Figura 40 apresenta a envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia-geomembrana lisa.

Figura 40 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GL



Em relação aos ângulos de atrito secantes de pico, pode-se observar uma pequena variação em relação ao apresentado pela envoltória de resistência ao cisalhamento de pico, pois os ângulos variaram entre 30° e 34° , como pode ser observado na Figura 41. Pode-se concluir que a envoltória trouxe um valor condizente para o ângulo de atrito e não ocorreu uma superestimação ou subestimação dos valores.

Figura 41 - Ângulos de atrito secantes de pico para a interface areia- GL



Nota: As tensões normais entre parênteses são as tensões corrigidas pela área.

Na Figura 42, são apresentadas as curvas que representam a variação da tensão cisalhante de pico em relação ao deslocamento horizontal (D_h). É possível observar que, para essa configuração, não ocorre um pico visível como na areia pura, e, além disso, os valores máximos de tensão cisalhante foram menores, especialmente com o aumento da tensão normal aplicada. Isso ocorre porque a geomembrana lisa não traz aderência para a interface, reduzindo o atrito mobilizado (Vangla; Gali, 2016).

As curvas de deslocamento vertical (D_v) versus deslocamento horizontal (D_h) dos corpos de provas da interface areia-geomembrana lisa estão apresentadas na Figura 43. Pode-se observar que, para esta interface, também ocorre uma redução de volume seguida de uma expansão, ou seja, ocorre a dilatância do material. Porém, neste caso, há uma menor variação

do deslocamento vertical. O comportamento dilatante observado indica que, embora ainda ocorra rearranjo granular durante o cisalhamento, a geomembrana lisa limita a expansão volumétrica do solo. Com isso, a mobilização da resistência ao cisalhamento é mais gradual e apresenta valores máximos inferiores aos da areia pura, principalmente para tensões normais mais altas, tornando a interface um possível plano preferencial de deslizamento em estruturas geotécnicas (Vangla; Dali, 2016; Khan; Latha, 2023; Chen et al., 2025).

Figura 42 - Tensão cisalhante (kPa) versus D_h (cm) para a interface areia- GL

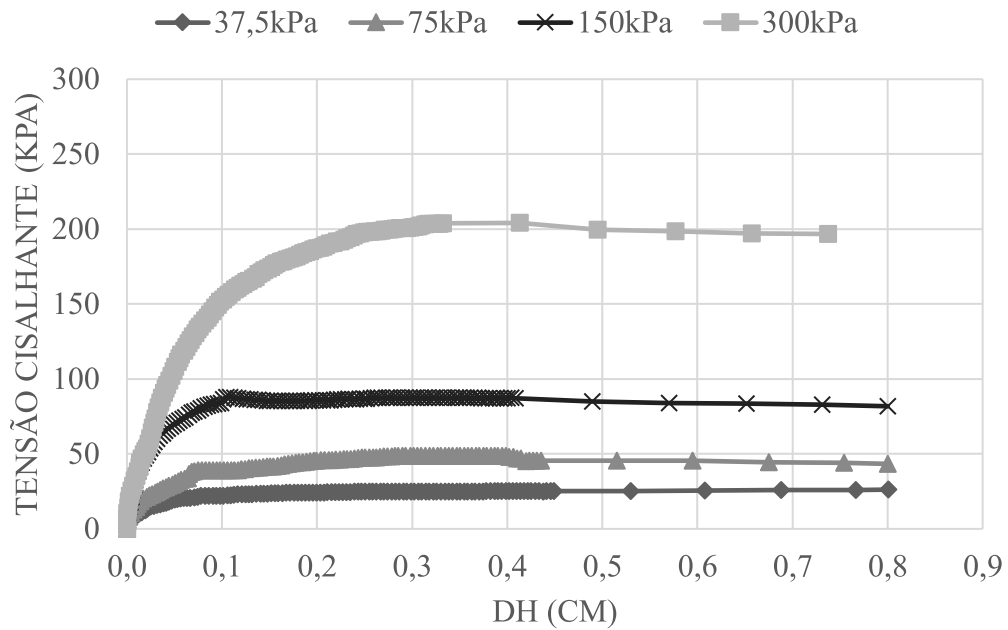
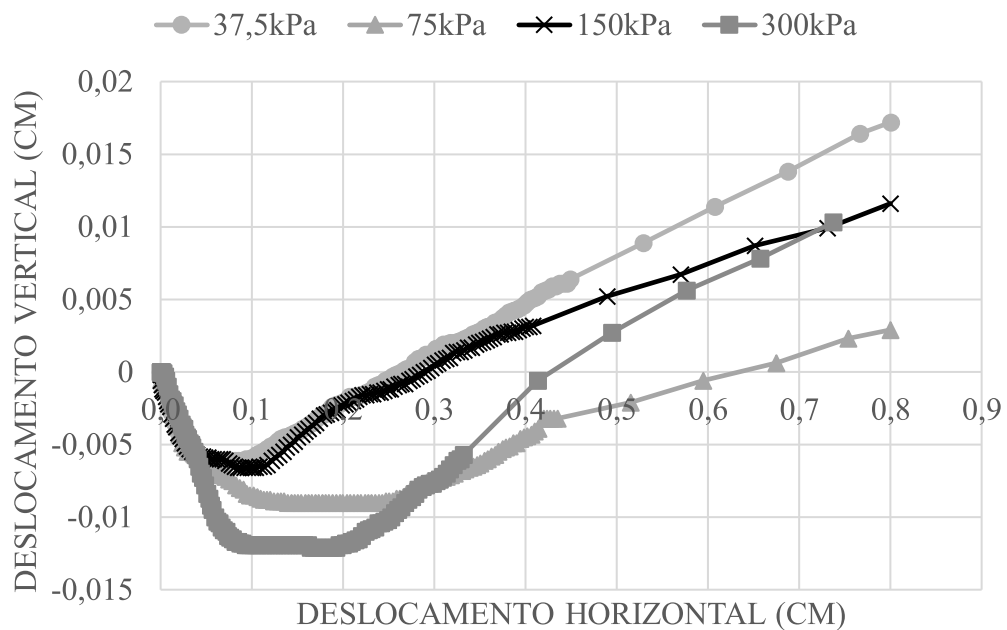
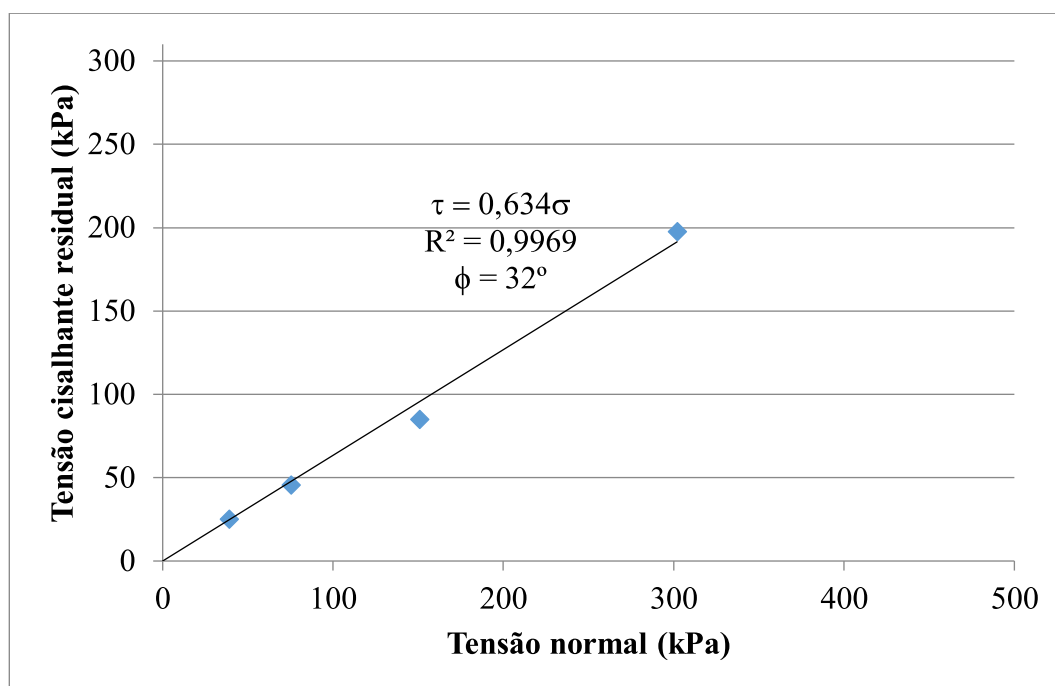


Figura 43 – D_v (cm) versus D_h (cm) para a interface areia - GL



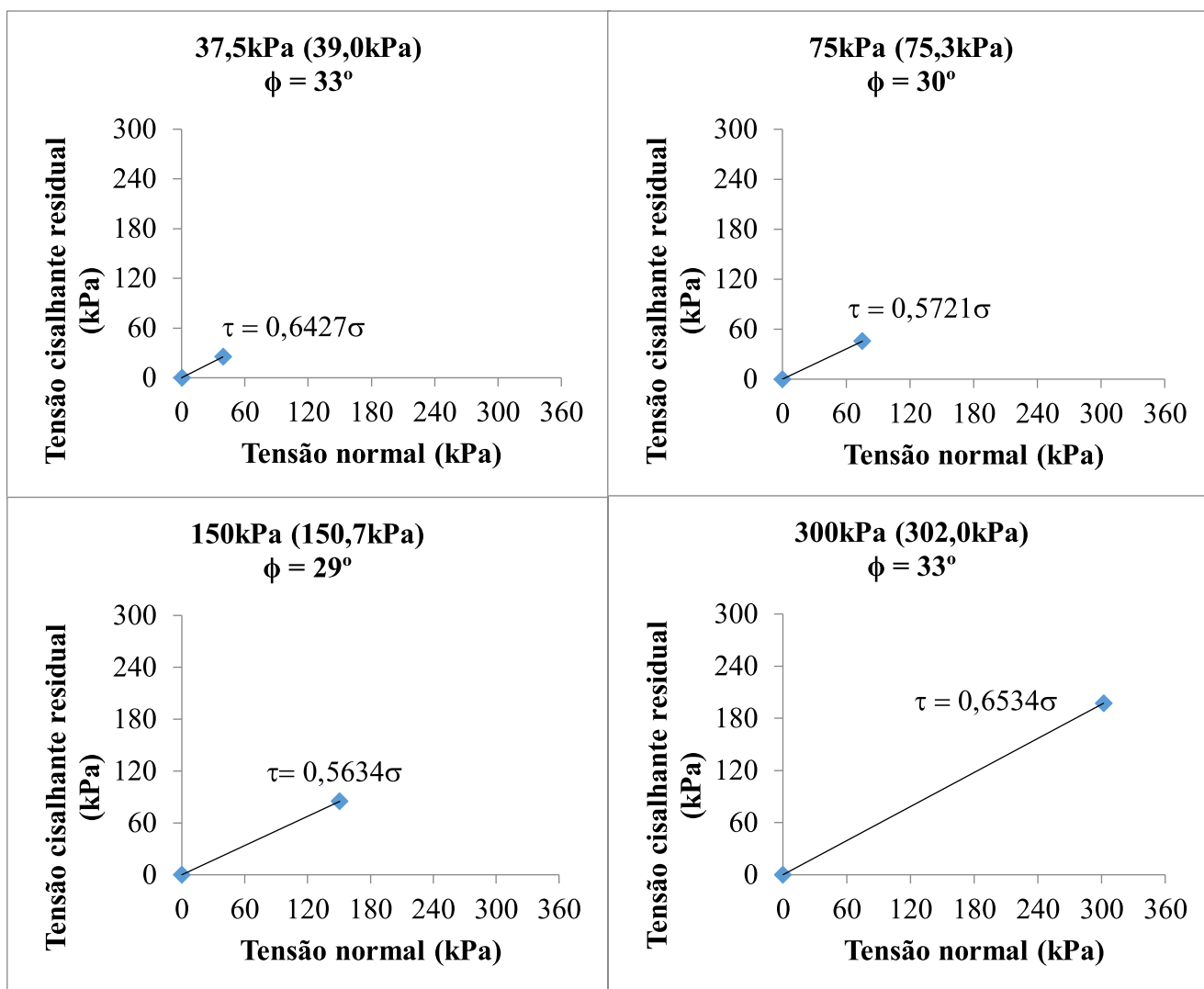
A Figura 44 apresenta a envoltória de resistência ao cisalhamento, considerando as tensões cisalhantes residuais. O ângulo de atrito (ϕ_r) obtido foi de 32° , correspondendo a uma redução pequena em comparação com a condição de pico, cujo ângulo de atrito foi 33° . Assim como a curva assíntota gerada no gráfico de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal apresentado anteriormente, esses resultados demonstram que a mobilização é mais gradual, chamando a atenção para a consideração dos resultados residuais para a aplicação em projetos, pois representam melhor o comportamento da estrutura ao longo do tempo.

Figura 44 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia- GL



Na Figura 45, pode-se observar os valores dos ângulos de atritos secantes para a condição residual da interface com a geomembrana lisa. Para esta análise, os resultados não tiveram diferenças significativas em relação ao valor obtido pela envoltória.

Figura 45 - Ângulos de atrito secantes residuais para a interface areia - GL



Nota: As tensões normais entre parênteses são as tensões corrigidas pela área.

4.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 01 – GT1A e GT1F

A geomembrana texturizada 01 apresenta uma variação na textura, considerando os dois lados (frente e verso) da amostra, conforme apresentado na seção de materiais e métodos deste trabalho. Por esse motivo, foi necessário fazer os ensaios para cada lado da geomembrana, com o objetivo de conferir se haveria ou não diferença nos resultados. A face com textura mais aberta foi designada como GT1A e a face com textura mais fechada foi designada como GT1F. Destaca-se que este tipo de textura da GT1 é produzido pelo método de matriz balão.

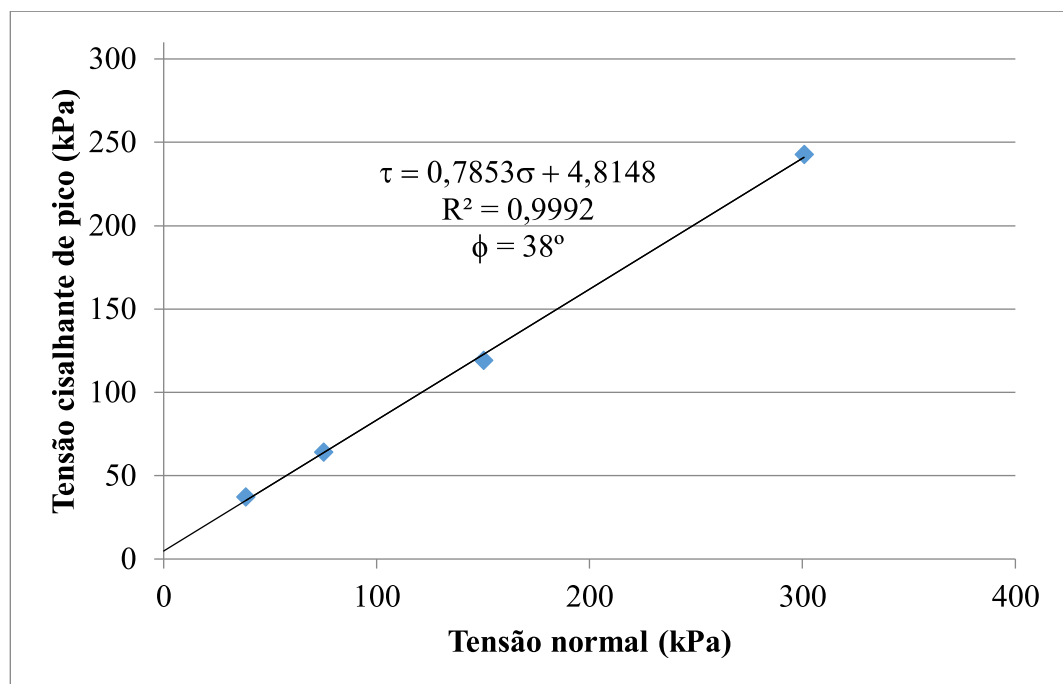
A partir de agora, as análises para ângulo de atrito só serão feitas pelas envoltórias, e não pela relação secante, isso porque as geomembranas texturizadas apresentam adesão, o que

inviabilizaria a análise de cada ponto, pois não estão partindo da origem (0,0) e sim do eixo em que é encontrado o valor da adesão.

4.3.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 01 (LADO ABERTO)

Para essa análise, foi considerado o lado com a rugosidade mais aberta para cima (GT1A), dentro da caixa de cisalhamento. A envoltória de resistência obtida está apresentada na Figura 46, e os resultados foram: ângulo de atrito de pico $\phi_p = 38^\circ$ e adesão aparente = 4,8kPa.

Figura 46 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GT1A



A Figura 47 apresenta a variação da tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal (Dh) ao longo do ensaio. Neste caso, pode-se observar que, somente para o ensaio com tensão normal maior, de 300kPa, ocorreu um pico para a tensão cisalhante. Isso pode ser explicado pelo fato de que a tensão normal mais alta traz uma maior mobilização do atrito e intertravamento.

Na Figura 48, são apresentadas as curvas de deslocamento vertical (Dv) versus descolamento horizontal (Dh). Assim como na geomembrana lisa, ocorreu uma redução do deslocamento vertical em comparação com a areia pura. Nesta configuração, entretanto, a dilatância foi ligeiramente inferior à da interface com geomembrana lisa, sugerindo que a resistência está relacionada parcialmente com o engrenamento mecânico provocado pelas

asperezas, pois, mesmo com uma menor expansão volumétrica, a interface trouxe melhores resultados em termos de resistência ao cisalhamento.

Figura 47 - Tensão cisalhante (kPa) versus D_h (cm) para a interface – GT1A

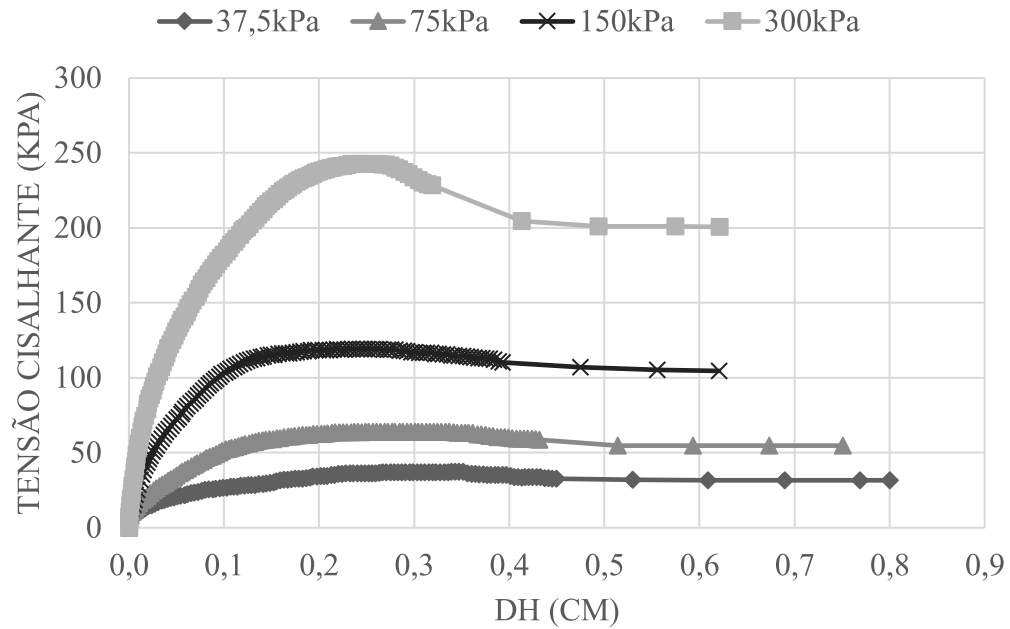
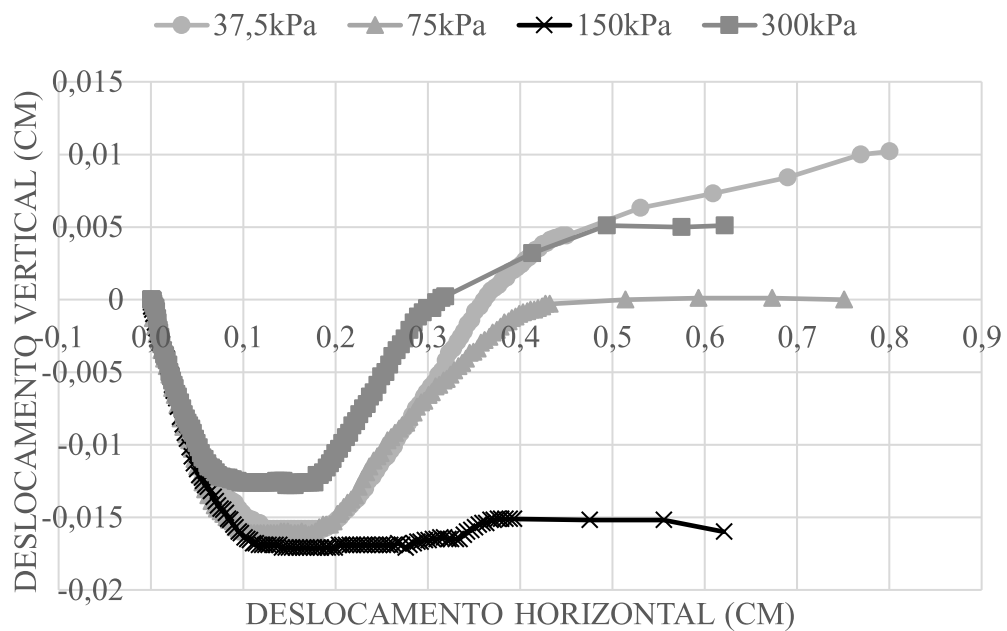


Figura 48 – D_v (cm) versus D_h (cm) para a interface – GT1A

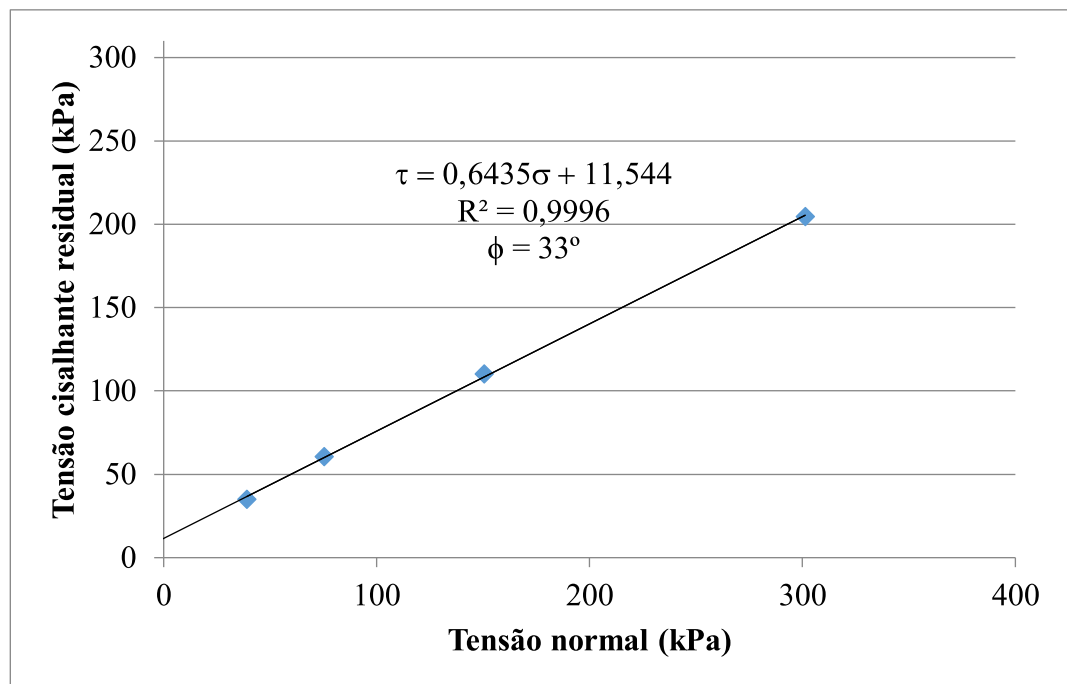


De acordo com Sobran (2014), para o tratamento de dados de resistência ao cisalhamento residual, não se considera a coesão como parcela participativa da resistência ao cisalhamento,

sendo considerado somente o atrito. Esta abordagem se aplica a solos puros com coesão verdadeira. Porém, existem algumas literaturas (Chiu; Fox, 2004; Dixon; Jones; Fowmes, 2006; Junior et al., 2023) que apresentam pesquisas com dados de adesão para interfaces entre solo e geossintético, razão pela qual serão avaliados, neste trabalho, os resultados com as respectivas adesões obtidas matematicamente através dos gráficos.

Sendo assim, para a envoltória de resistência ao cisalhamento residual, ocorreu uma diminuição do ângulo de atrito para 33° e um aumento da adesão aparente para 11,5kPa (Figura 49). A redução do ângulo de atrito se deve à perda de dilatância e do intertravamento inicial pós pico, o que é esperado. Já o aumento da adesão indica que houve uma maior acomodação das partículas nas irregularidades da geomembrana ao longo do cisalhamento.

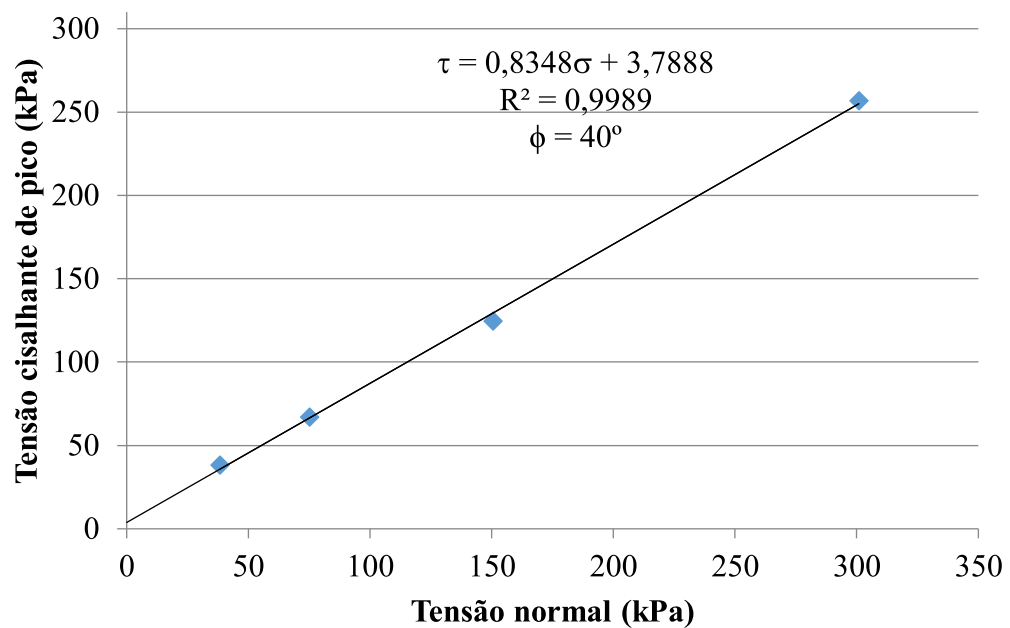
Figura 49 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT1A



4.3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 01 (LADO FECHADO)

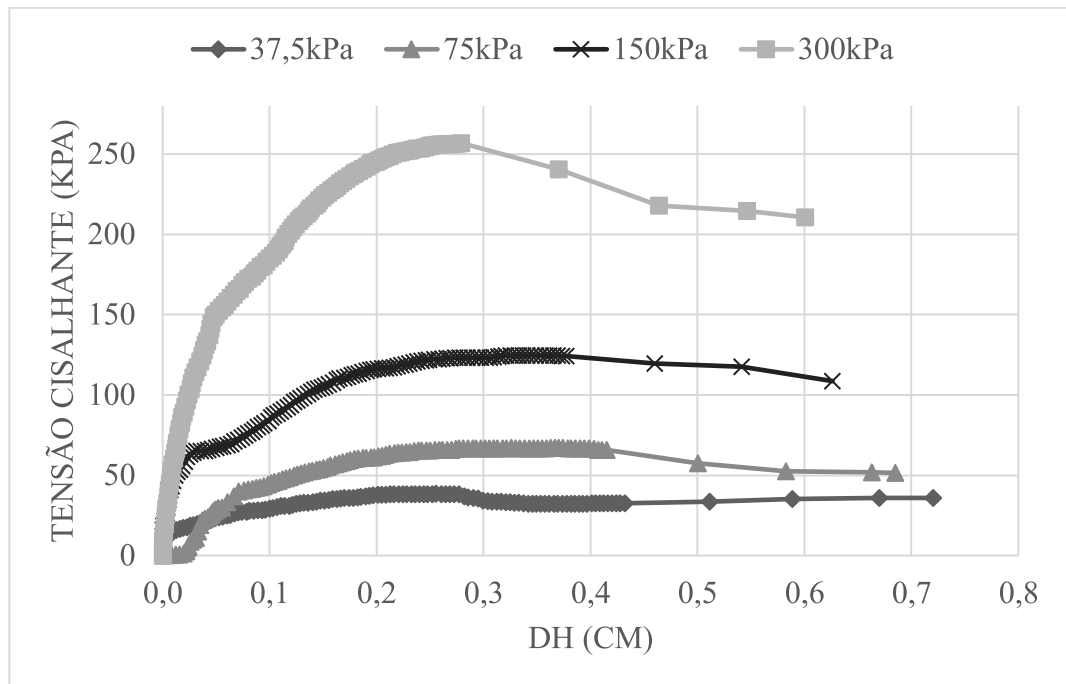
A geomembrana texturizada 01, com o lado fechado para cima (GT1F), apresentou uma pequena redução no valor da adesão, porém teve um aumento no seu valor de ângulo de atrito de pico em comparação com a GT1A. Neste caso, a adesão aparente foi de 3,8 kPa, e o ângulo de atrito (ϕ_p) foi de 40° . A envoltória de resistência está apresentada na Figura 50.

Figura 50 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GT1F



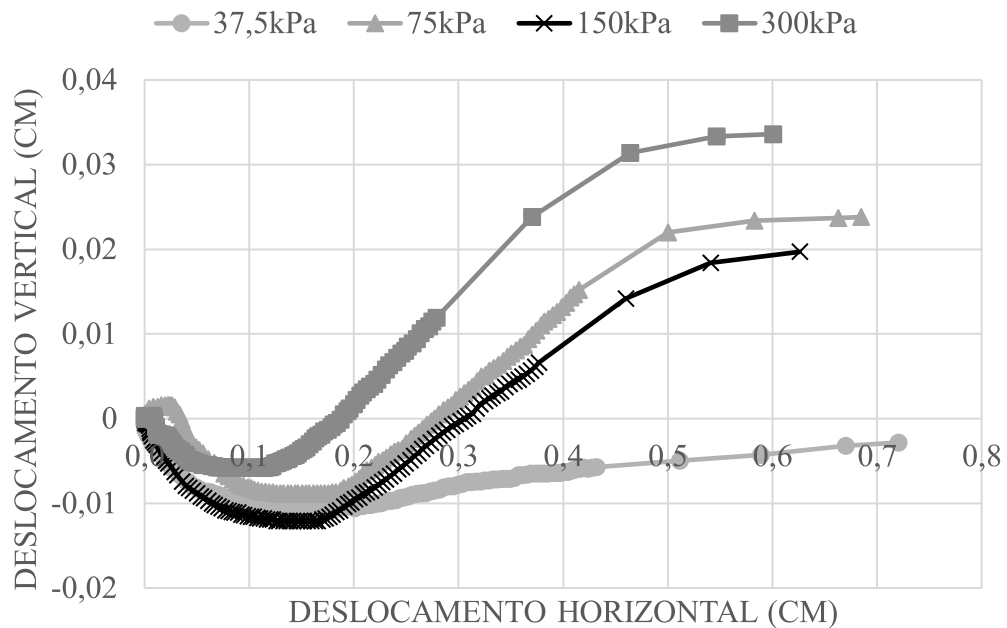
A variação da tensão cisalhante em função do deslocamento horizontal está presente na Figura 51. As curvas foram semelhantes ao encontrado para este mesmo tipo de geomembrana com o lado aberto, conforme visto no tópico anterior.

Figura 51 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia- GT1F



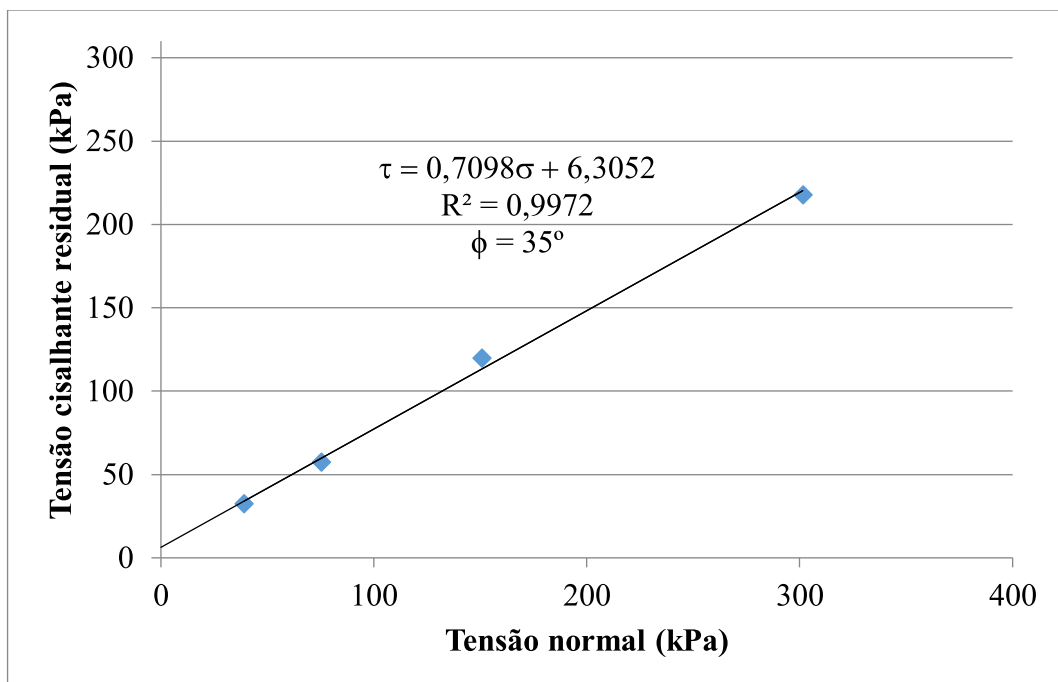
Considerando o deslocamento vertical (Dv) versus descolamento horizontal (Dh), para esta interface, ocorreu uma variação um pouco maior do deslocamento vertical comparado com o deslocamento da geomembrana com o lado aberto. Neste caso, ocorreu um aumento da dilatância, que pode ser interpretada como uma melhoria na capacidade mecânica em termos de resistência ao cisalhamento, devido à expansão e acomodação das partículas do solo com a textura da geomembrana. (Figura 52).

Figura 52 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia– GT1F



Em relação à envoltória de resistência ao cisalhamento residual, assim como na interface anterior (areia - GT1A), ocorreu uma redução do ângulo de atrito e um aumento da adesão para a envoltória residual em comparação com a envoltória de pico. O ângulo de atrito obtido foi 35°, e a adesão aparente foi de 6,3 kPa (Figura 53).

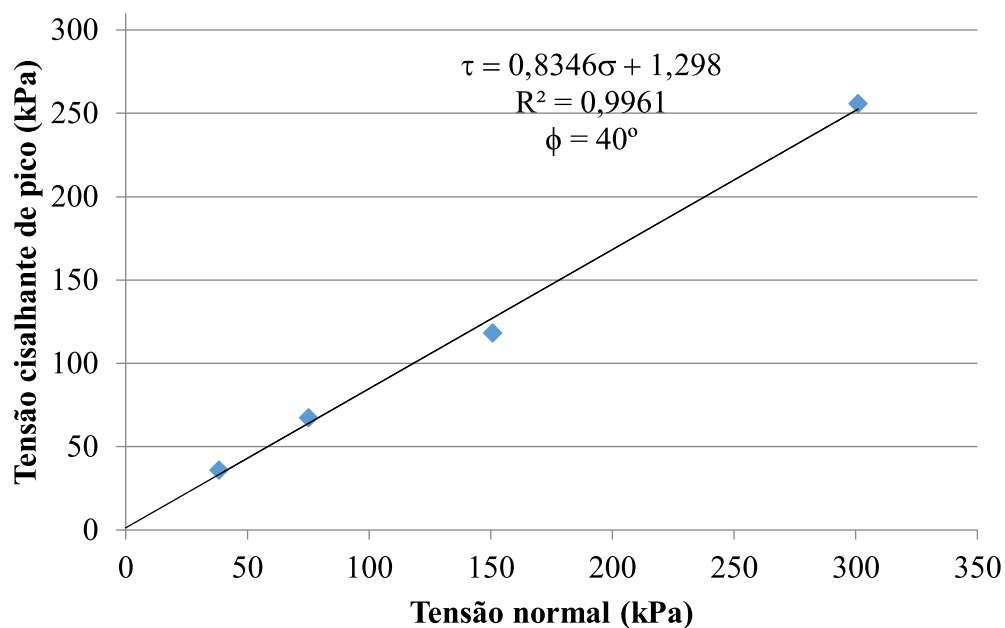
Figura 53 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT1F



4.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 02 – GT2

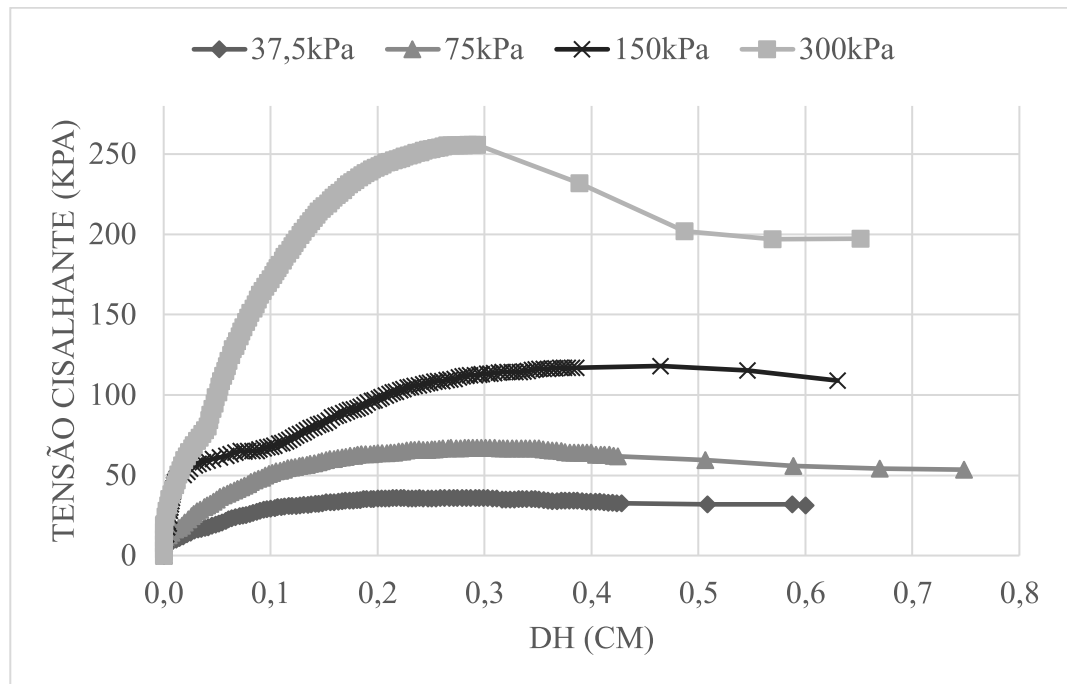
A geomembrana texturizada 02 apresentou um resultado semelhante à geomembrana texturizada anterior, em termos de ângulo de atrito, porém a adesão aparente se mostra inferior. Porém, neste caso, a GT2 foi produzida pelo método de matriz plana. Pela análise da envoltória de resistência (Figura 54), foram encontrados um ângulo de atrito (ϕ_p) = 40° e uma adesão aparente (a) = 1,3 kPa.

Figura 54 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GT2



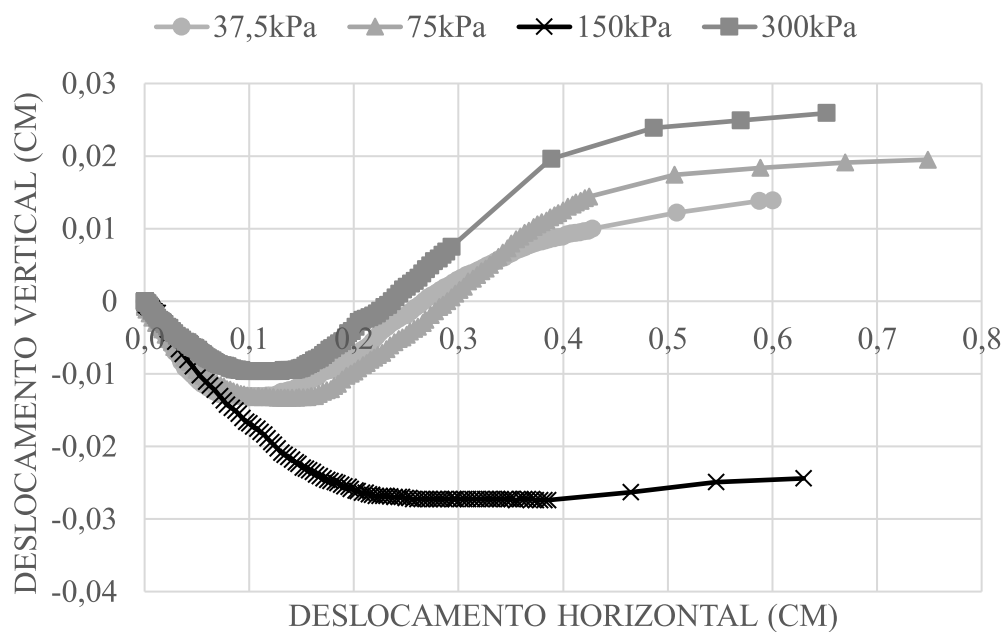
A relação tensão cisalhante versus deslocamento horizontal (Dh) é apresentada na Figura 55. Não ocorreram alterações expressivas em comparação com as outras interfaces, em termos de valor máximo de tensão cisalhante. Para tensões maiores, como 300kPa, ocorre um pico visível de tensão seguido de uma queda para a tensão residual, pós ruptura. Isso pode ser explicado pelo fato de que as tensões mais baixas provocam um menor confinamento e intertravamento mecânico, com isso, a resistência é desenvolvida de forma mais gradual e progressiva, sem o surgimento de pico aparente no gráfico.

Figura 55 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia – GT2



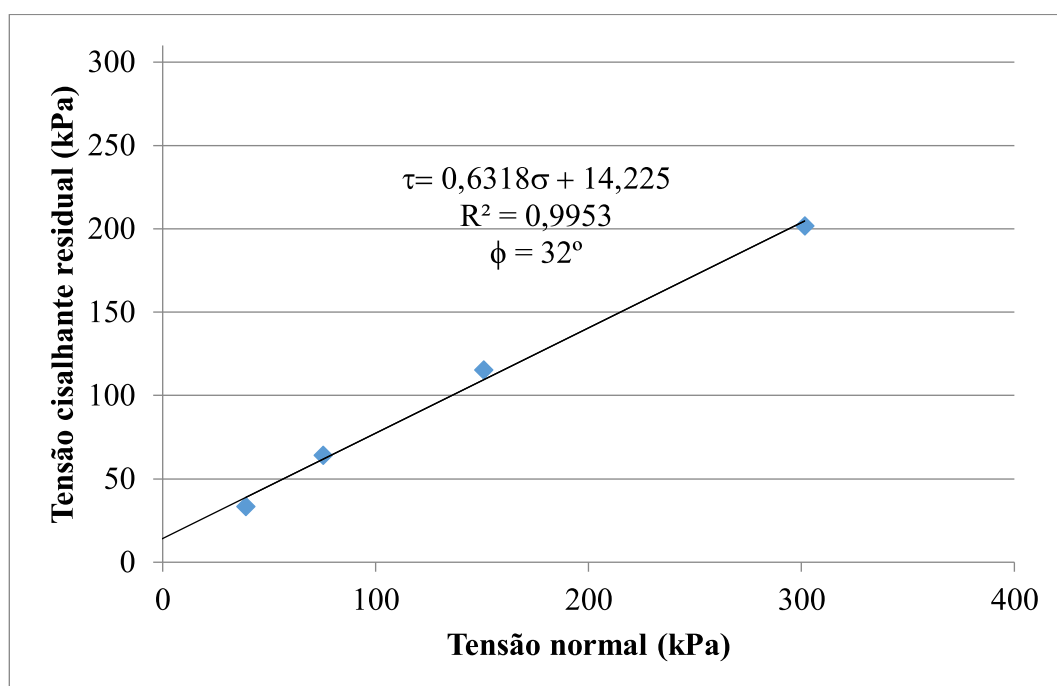
Na Figura 56, a relação entre o deslocamento vertical (Dv) e o deslocamento horizontal (Dh) demonstra uma dilatância dos corpos de prova, exceto para o ensaio com tensão normal aplicada de 150kPa, que apresentou um comportamento de redução de volume e pode estar relacionado a uma pequena interferência experimental pontual, não sendo representativo da tendência geral observada nos demais ensaios.

Figura 56 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia– GT2



A envoltória para a resistência ao cisalhamento residual desta interface apresentou um comportamento similar ao visto para a interface areia-GT1, pois também apresentou uma diminuição do ângulo de atrito e um aumento da adesão aparente. O ângulo de atrito encontrado foi de 32° , e a adesão aparente sofreu um aumento importante, passando a ser de 14,2kPa (Figura 57). É interessante destacar esta comparação com a GT1, pois esta possui uma texturização feita por matriz balão, diferentemente da GT2, que é por matriz plana. Os resultados mostram que o aumento da adesão para a condição residual mostrou-se mais eficiente para a GT2.

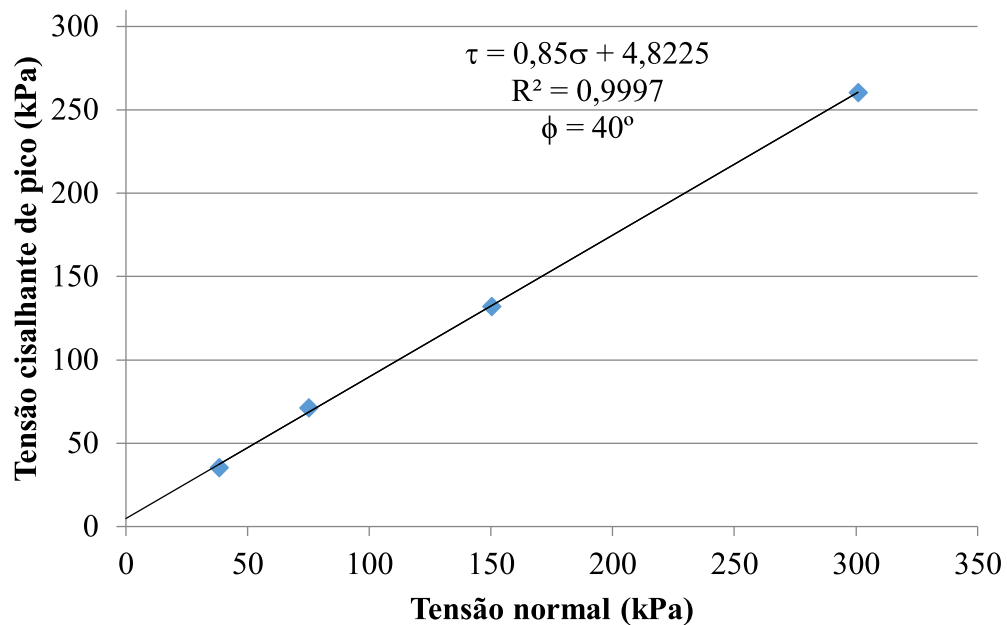
Figura 57 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT2



4.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA TEXTURIZADA 03 – GT3

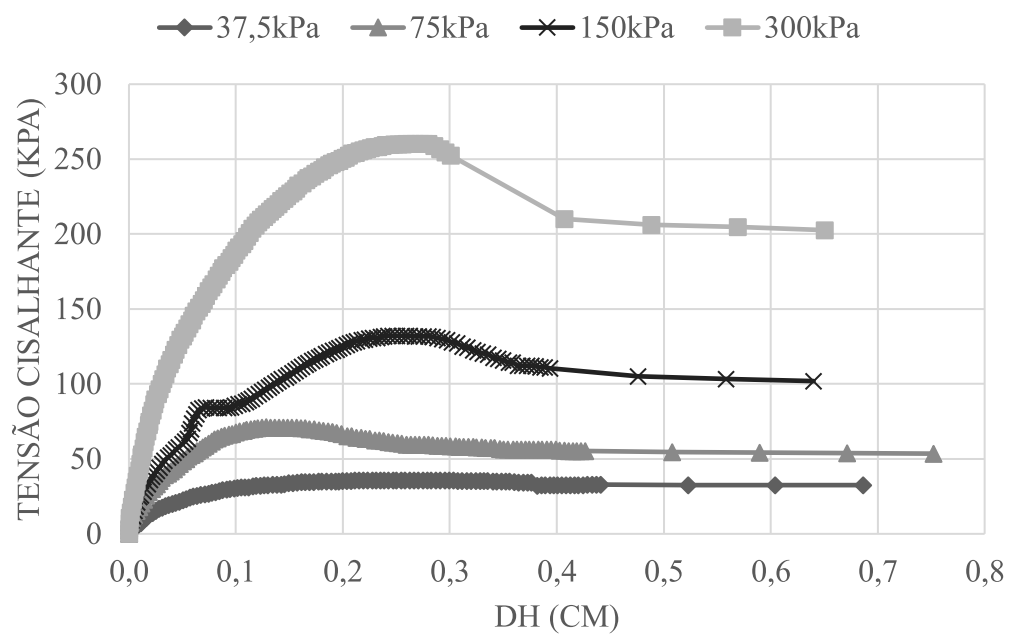
A geomembrana texturizada 03 foi a que apresentou uma melhor combinação de resultados dentre as interfaces apresentadas, considerando os dois principais aspectos da resistência ao cisalhamento, que são a adesão e o ângulo de atrito. A GT3 é produzida pelo processo de matriz plana, e para esta análise, foram obtidos como resultados um ângulo de atrito (ϕ_p) = 40° e uma adesão aparente (a) = 4,8kPa (Figura 58).

Figura 58 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GT3



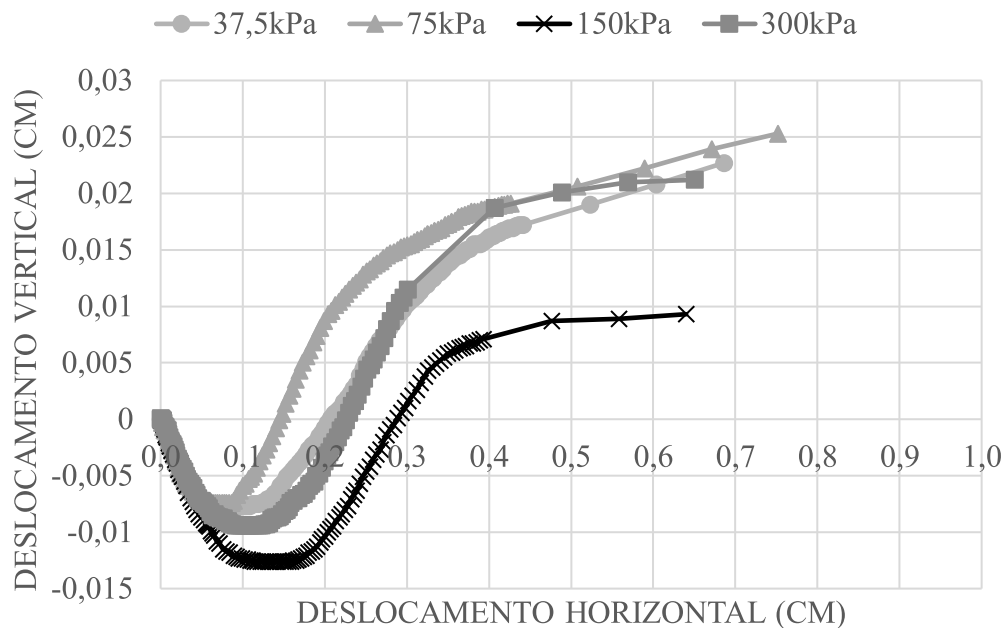
A variação da tensão cisalhante em relação ao deslocamento horizontal (Figura 59) apresentou um comportamento semelhante ao que já foi visto para as outras geomembranas, com a tendência de pico visível para as maiores tensões normais, por conta do maior intertravamento mecânico, gerando um pico de resistência.

Figura 59 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia- GT3



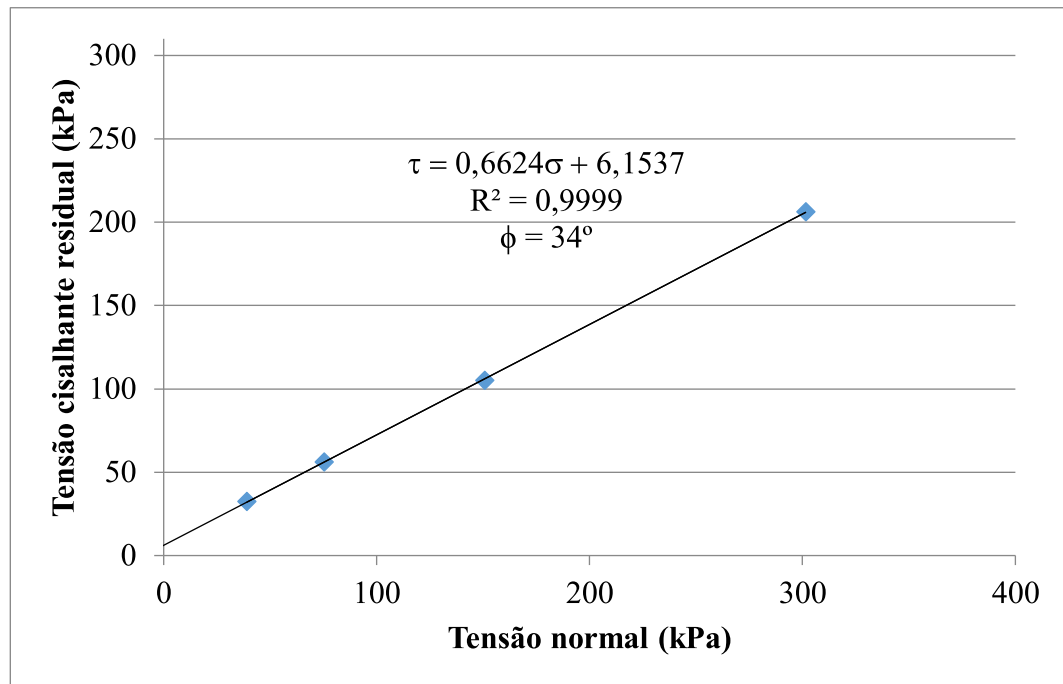
O deslocamento vertical versus deslocamento horizontal está apresentado na Figura 60 e indica uma dilatância, assim como nos outros casos, tendo uma redução inicial de volume seguida de um aumento de volume, sendo uma constatação importante, pois a dilatância aumenta a tensão efetiva vertical e contribui para o aumento de resistência por atrito de superfície (Wood, 2014).

Figura 60 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia– GT3



Finalmente, com a análise da envoltória da resistência ao cisalhamento residual (Figura 61), é possível dizer que ocorreu o mesmo processo de redução do ângulo de atrito e aumento da adesão aparente. O ângulo de atrito passou a ser de 34° , e a adesão aparente ficou igual a 6,1kPa.

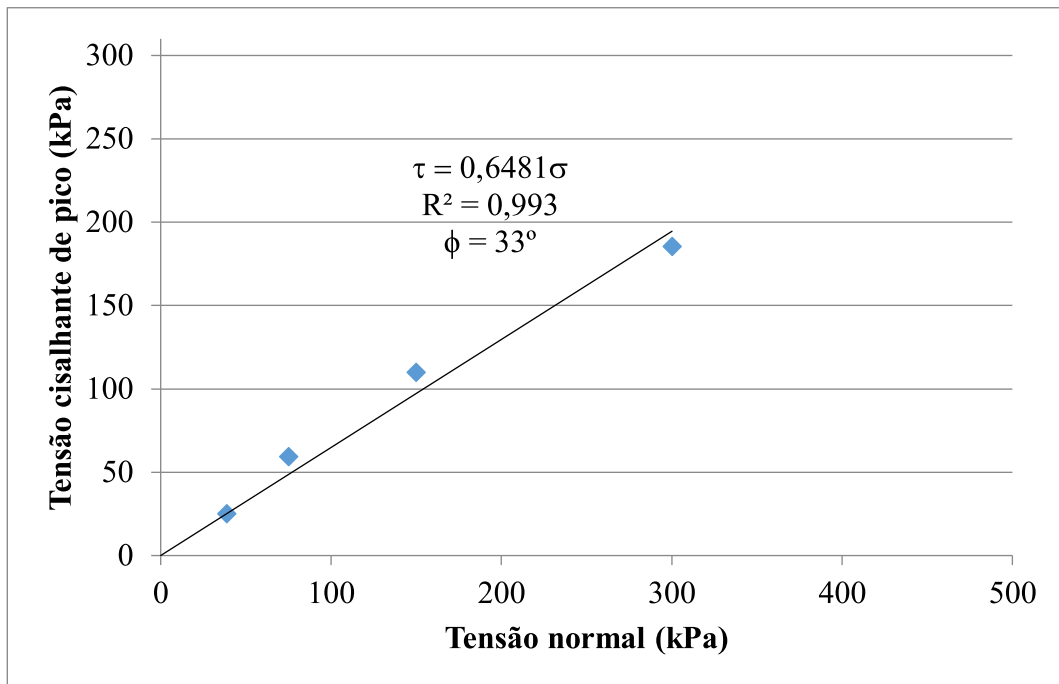
Figura 61 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia – GT3



4.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA LISA – GIL

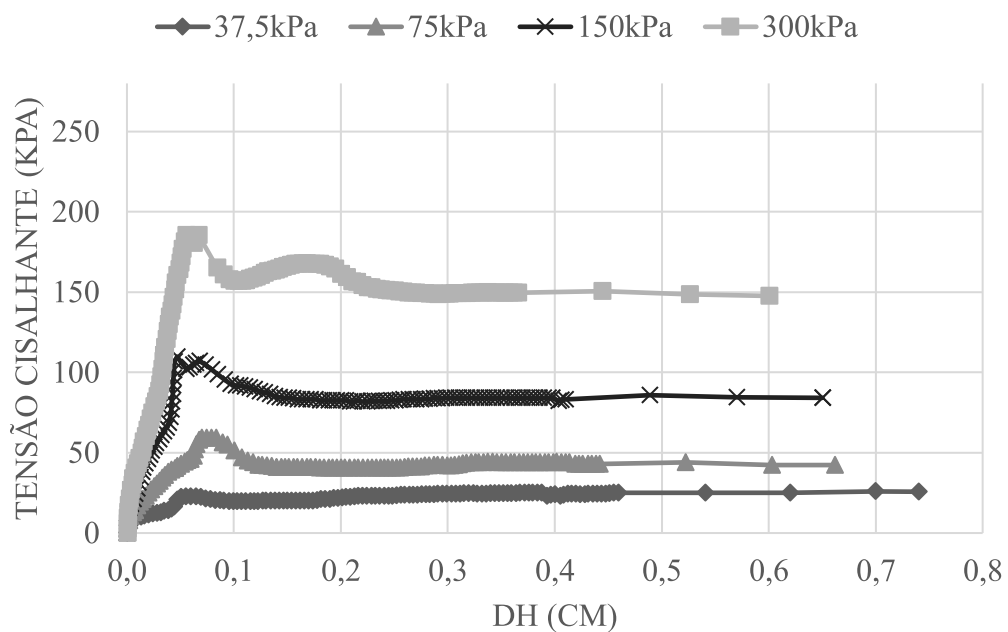
O primeiro modelo criado na impressora 3D foi liso, ou seja, sem asperezas. Os resultados, em termos de envoltória, mostraram semelhança com a geomembrana lisa comercial que foi ensaiada, o que facilitou a comparação dos próximos resultados com as geomembranas comerciais, considerando o aumento do ângulo de atrito e da adesão para cada rugosidade incrementada para os novos modelos. A envoltória exposta na Figura 62 apresentou um ângulo de atrito de pico (ϕ_p) = 33° e uma adesão (a) = 0 kPa, indicando uma resistência semelhante à da geomembrana lisa comercial (GL).

Figura 62 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia - GIL



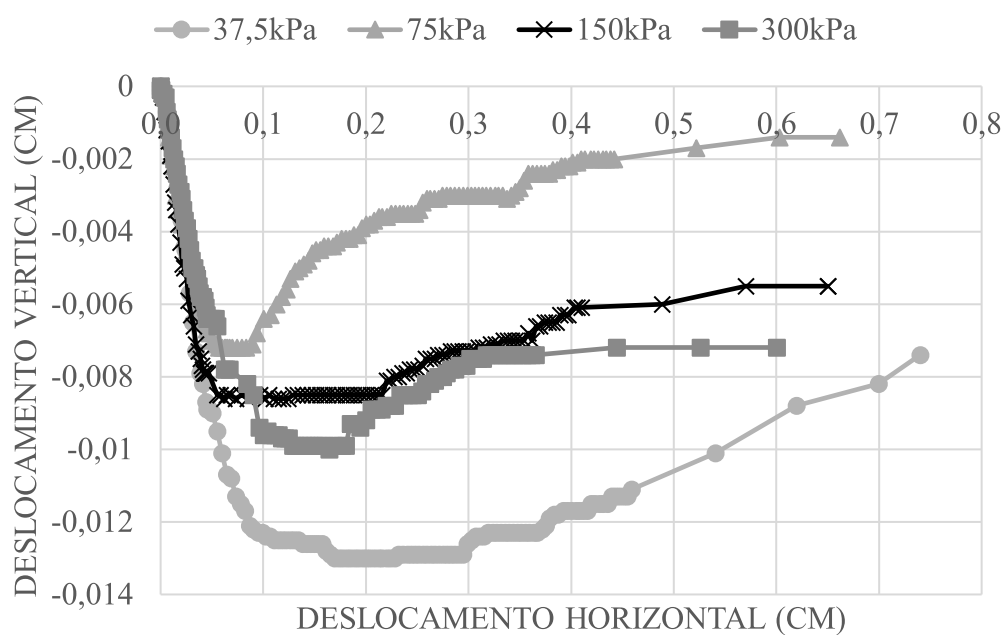
A tensão cisalhante versus deslocamento horizontal apresentada na Figura 63 mostra que, para todas as tensões normais aplicadas, ocorre um pico da tensão cisalhante, seguido de uma queda para uma tensão residual. Assim como nas geomembranas comerciais, ocorre um pico mais visível para as tensões mais altas de 150 e 300kPa, o que é esperado, devido ao maior confinamento provocado pelo aumento da tensão normal.

Figura 63 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia - GIL



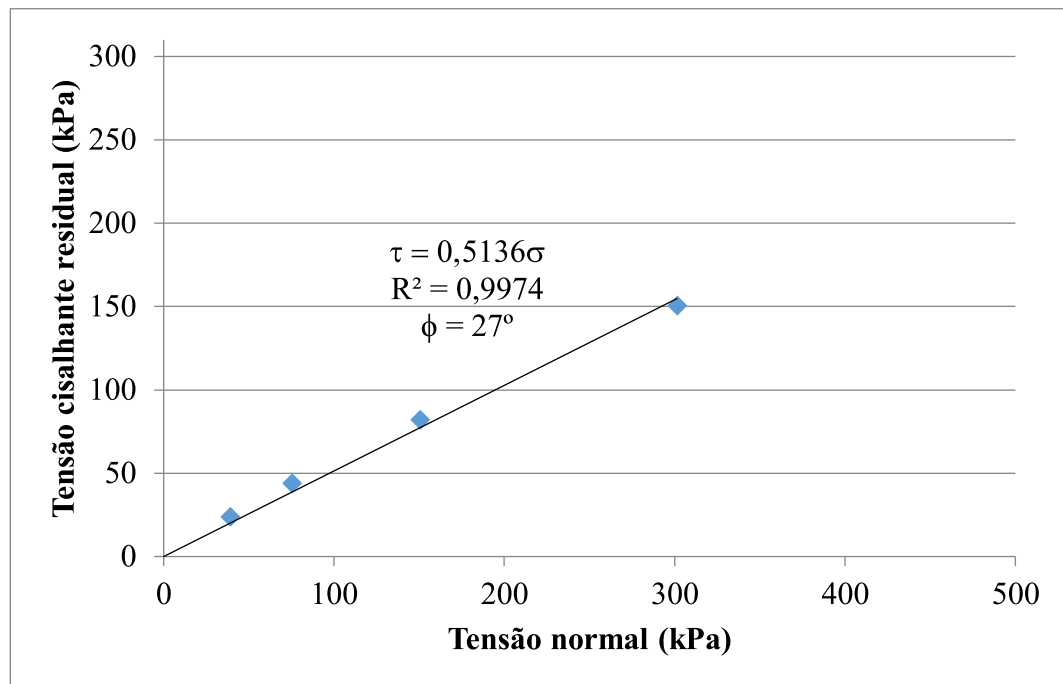
Para a curva de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (Figura 64), é possível observar um comportamento diferente em relação às outras interfaces já apresentadas, pois, em todos os casos de tensões normais aplicadas, ocorre a redução do volume do corpo de prova.

Figura 64 – D_v (cm) versus D_h (cm) para a interface areia- GIL



Para a análise da envoltória de resistência ao cisalhamento na condição residual, o ângulo de atrito caiu para 27° (Figura 65), sendo uma diminuição considerável em relação à geomembrana lisa comercial (GL), que saiu de 33° na condição de pico, para 32° na condição residual.

Figura 65 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia- GIL



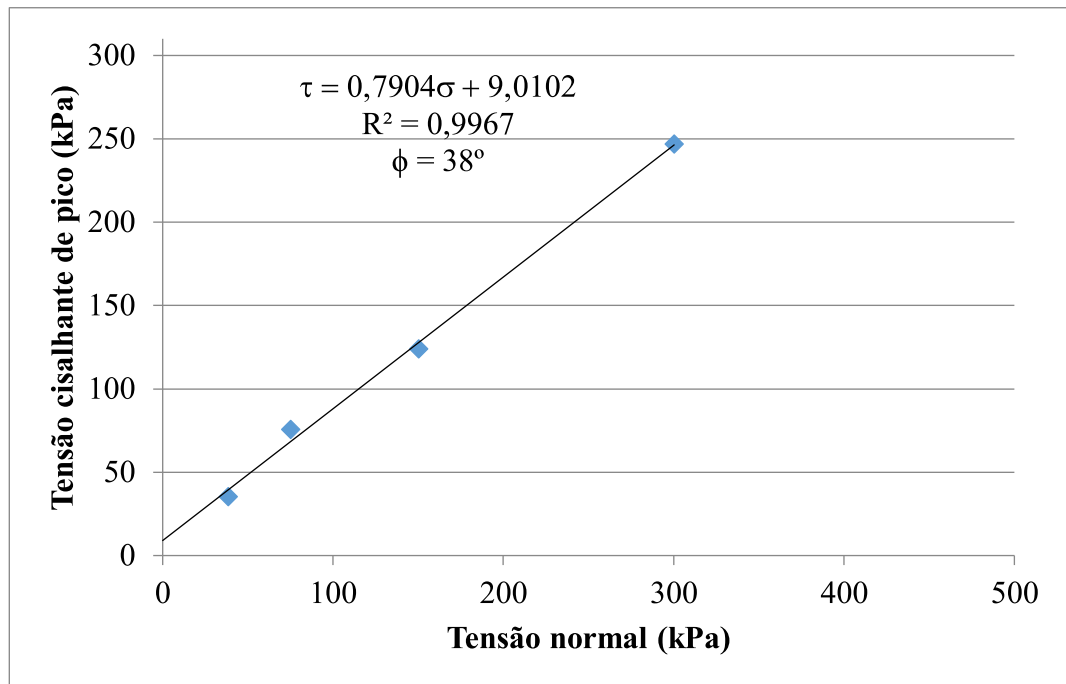
4.7 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 03 – GI3

Foram adotadas diferentes quantidades de ranhuras para as geomembranas impressas, com o intuito de avaliar a diferença de comportamento com base na quantidade de ranhuras e no espaçamento entre elas. Deixando sempre as bordas livres, optou-se inicialmente pela adoção de três ranhuras, adicionando-se o dobro para cada novo modelo até chegar no último com 12 ranhuras e espaçamento de 5,96mm, valor semelhante ao espaçamento entre rugosidades das geomembranas comerciais de matriz plana avaliadas neste trabalho.

Para esta interface, foram feitas três ranhuras longitudinais na geomembrana feita pela impressora 3D. Os ensaios mostraram bons resultados, pois o ângulo de atrito foi semelhante ao das geomembranas texturizadas comerciais, e houve um ganho na adesão, também em comparação com as comerciais utilizadas anteriormente.

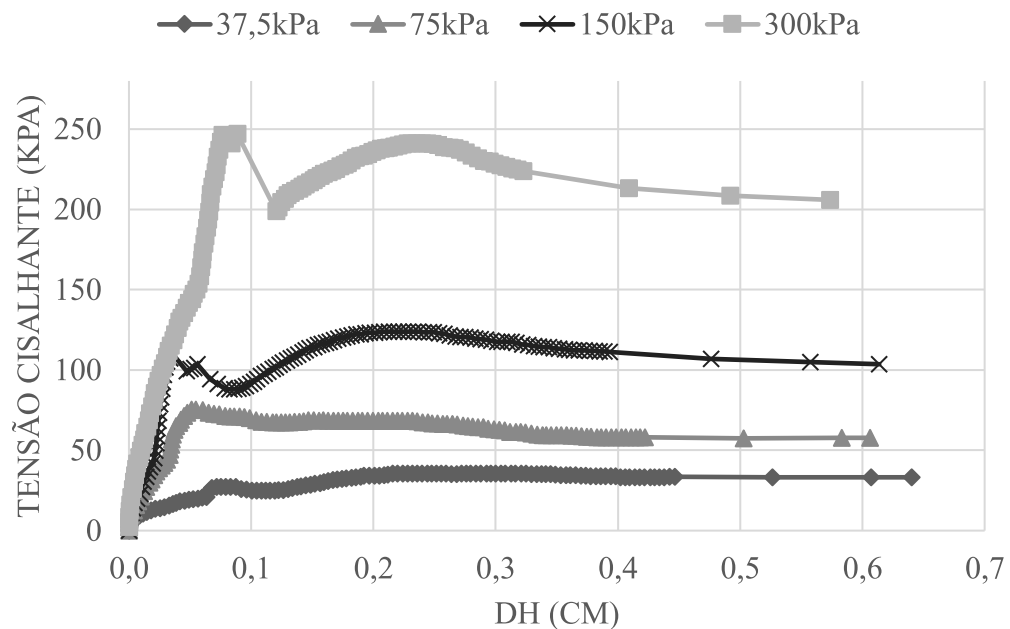
A Figura 66 mostra a envoltória de resistência ao cisalhamento de pico, com o ângulo de atrito de pico (ϕ_p) = 38° e uma adesão aparente (a) = 9,0kPa.

Figura 66 - Envoltória da resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GI3



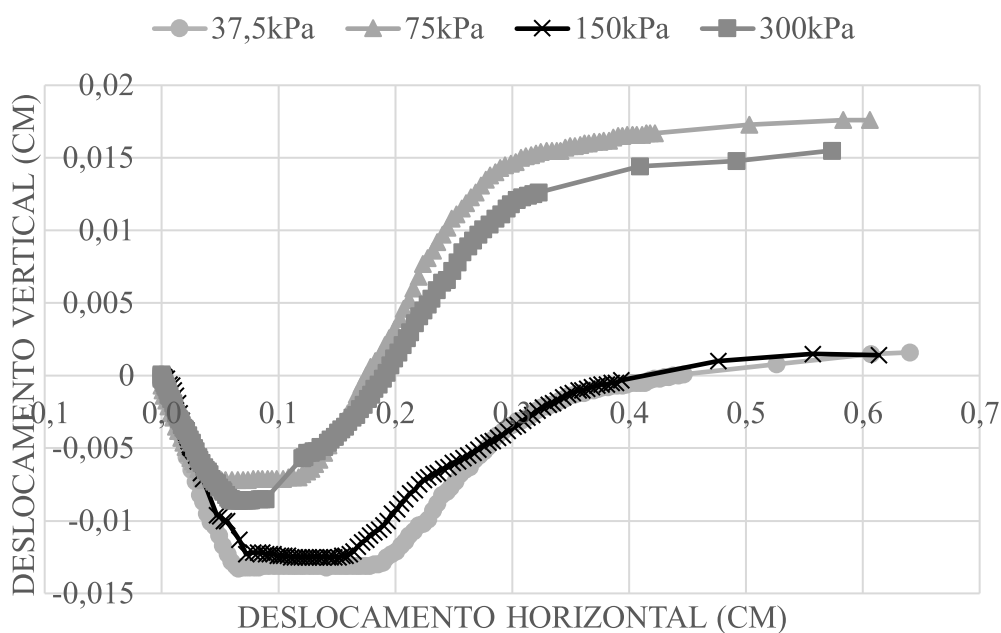
Seguindo as análises para esta interface, na Figura 67, é possível observar o mesmo padrão de comportamento, tratando-se da curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, em relação às outras interfaces apresentadas. Tem-se um pico da tensão cisalhante seguido de uma queda para a tensão residual, e, para as tensões mais altas, ocorre um novo aumento da tensão cisalhante antes de cair para a tensão residual, indicando que pode ter ocorrido uma ruptura localizada. Do ponto de vista geotécnico, demonstra-se que a resistência de pico não representa necessariamente a condição de longo prazo, sendo a resistência residual fundamental para análises de estabilidade.

Figura 67 - Tensão cisalhante (kPa) versus Dh (cm) para a interface areia - GI3



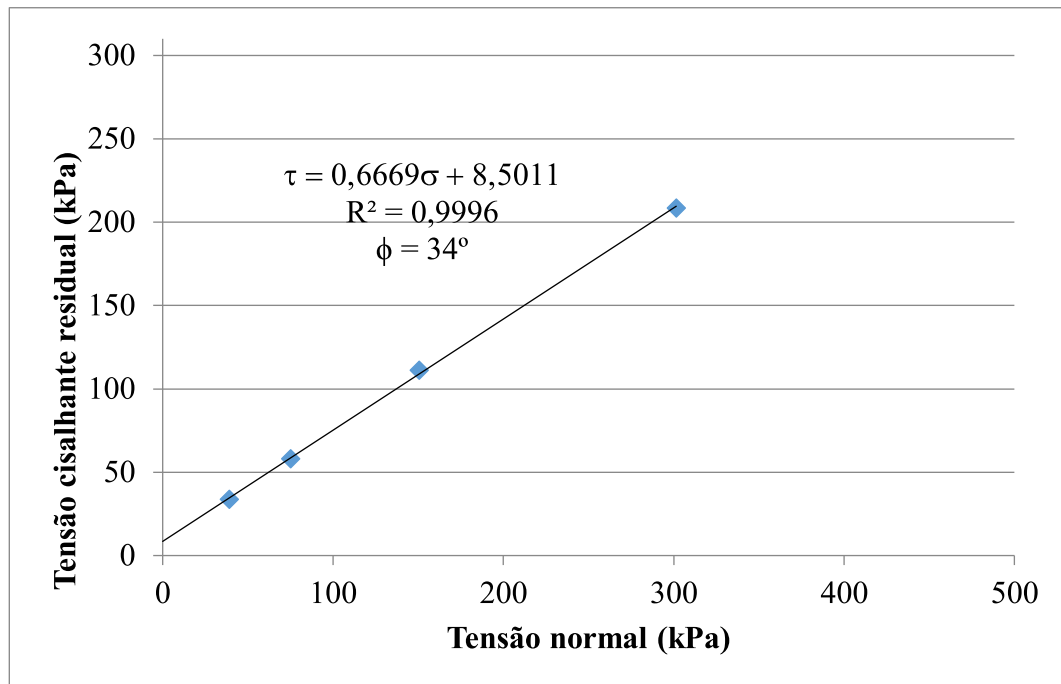
Na Figura 68, tem-se o gráfico do deslocamento vertical versus deslocamento horizontal. Para este caso, ocorre uma diminuição de volume seguida de um aumento, caracterizando a dilatância como nos casos anteriores de interface com geomembranas comerciais, caracterizando a melhoria na resistência por atrito de superfície.

Figura 68 – Dv (cm) versus Dh (cm) para a interface areia- GI3



Para a condição de resistência ao cisalhamento residual, foi observada uma diminuição do ângulo de atrito e, também, uma leve diminuição da adesão. O ângulo de atrito residual encontrado foi 34° e a adesão aparente igual a 8,5kPa. (Figura 69). Considerando esses dois principais parâmetros para a avaliação da resistência ao cisalhamento, considera-se que houve prejuízo em termos de ganho de resistência na condição residual para esta interface.

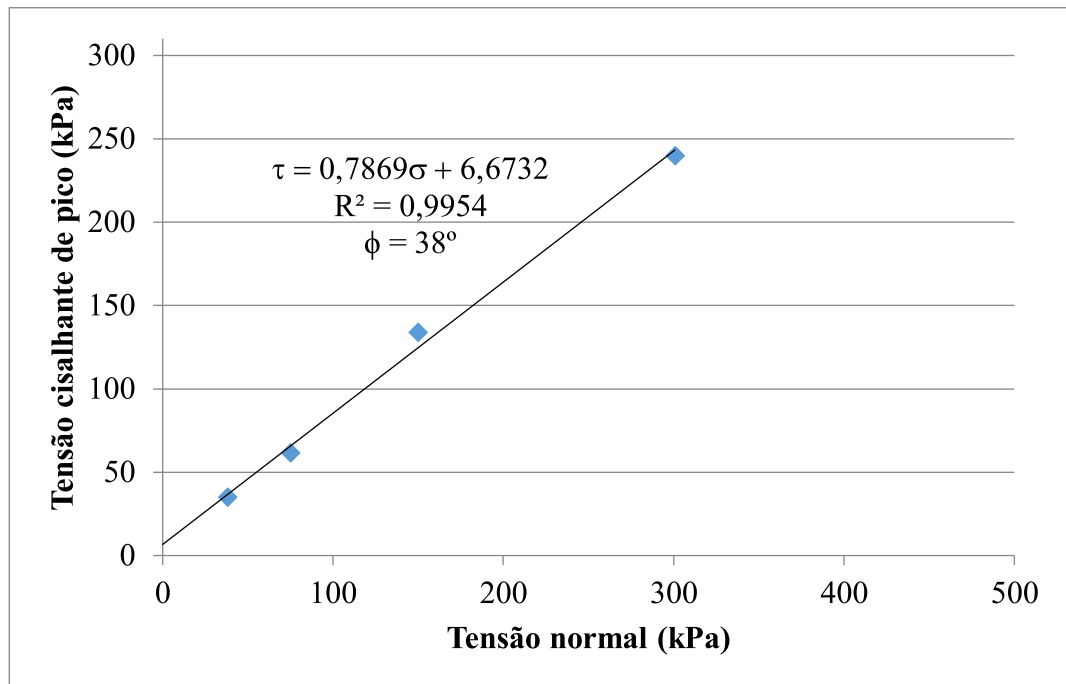
Figura 69 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI3



4.8 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 06 – GI6

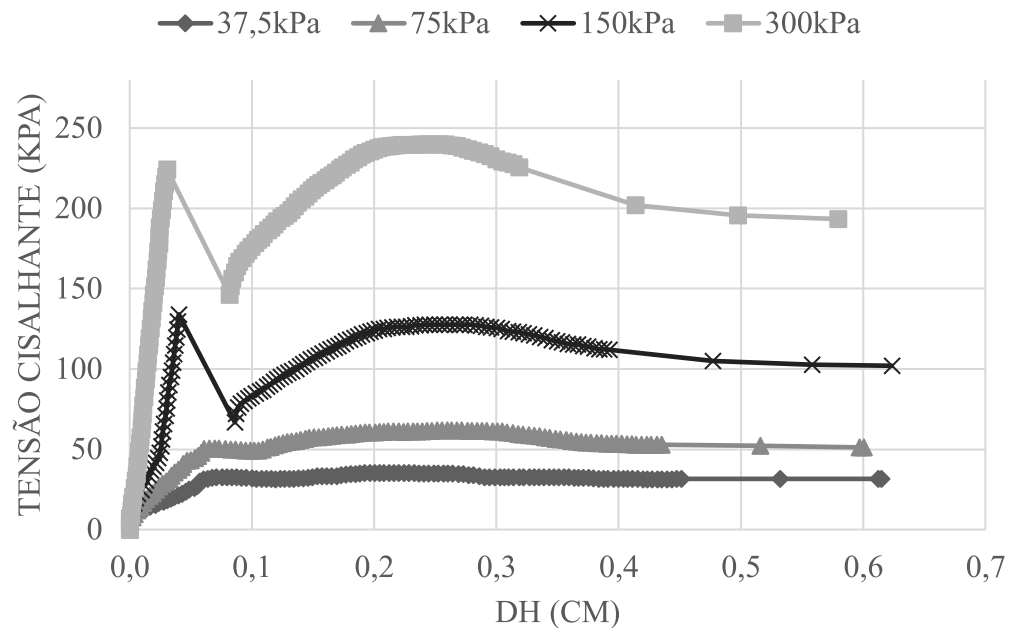
Nesta interface, foi utilizada a geomembrana impressa com 06 ranhuras, e os resultados foram semelhantes aos da interface anterior. A Figura 70 apresenta a envoltória obtida com o ângulo de atrito de pico (ϕ_p) = 38° e a adesão aparente (a) = 6,7kPa.

Figura 70 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia - GI6



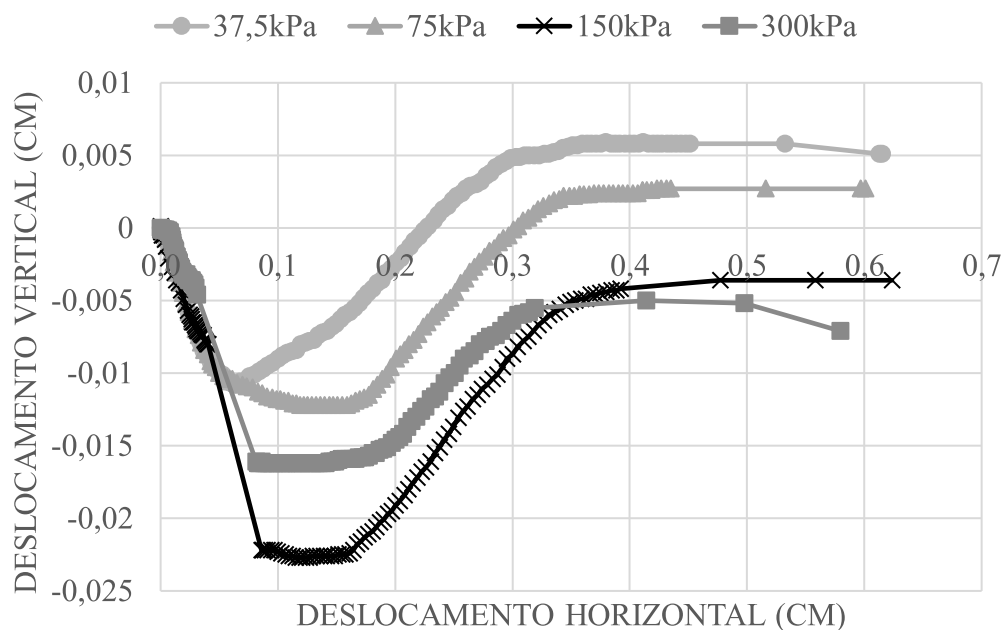
É possível observar, nos gráficos de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, um pico de tensão cisalhante para as tensões normais mais altas, seguido de uma queda, ocorrendo, em seguida, um novo crescimento da tensão cisalhante até que se atinja a fase residual, o que também pode ser ocasionado por uma ruptura localizada (Figura 71). Esse fenômeno pode ser explicado por conta do galgamento dos grãos sobre a aspereza da geomembrana com possível rearranjo posterior dos grãos com acomodação.

Figura 71 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI6



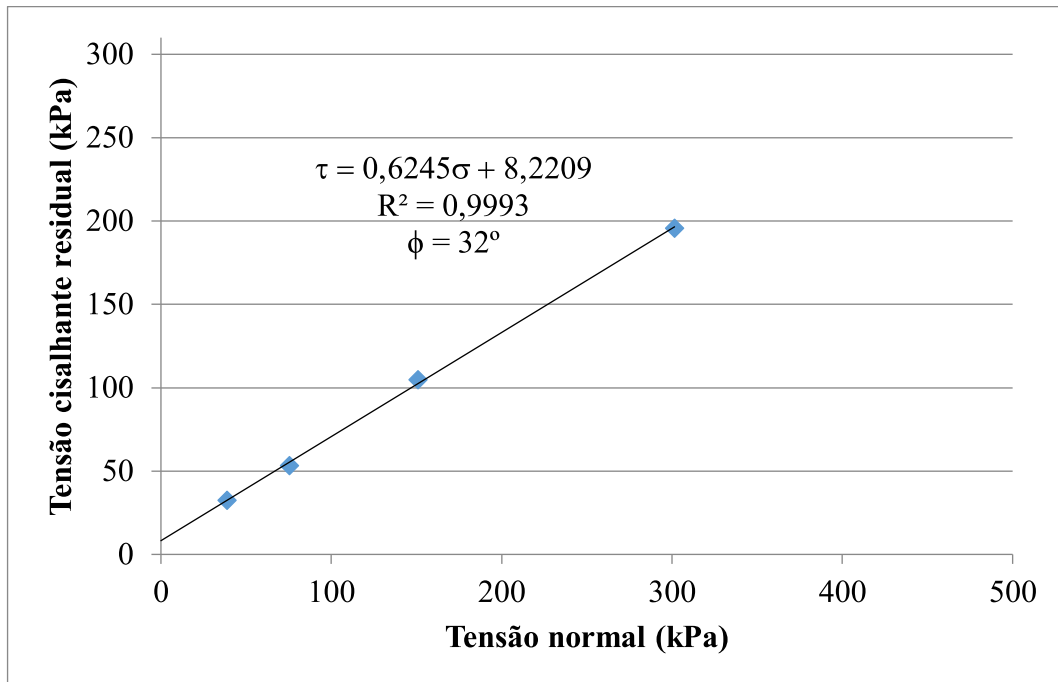
Na curva de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, ocorre uma diminuição do volume, seguida de um aumento. Porém, para esta interface, somente os corpos de prova que receberam tensões mais baixas de 37,5 e 75kPa atingiram um volume superior ao estado original, o que pode ser explicado pelo menor confinamento imposto pelas tensões, o que fez com que o corpo de prova tivesse uma maior facilidade para a expansão (Figura 72).

Figura 72 – Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI6



Para a análise residual, o ângulo de atrito diminuiu em relação à envoltória de pico, passando a ser 32° , e a adesão aparente aumentou para 8,2kPa. (Figura 73). Portanto, embora o ângulo de atrito tenha diminuído, o aumento da adesão pode ser importante na mobilização e ganho de resistência por cisalhamento.

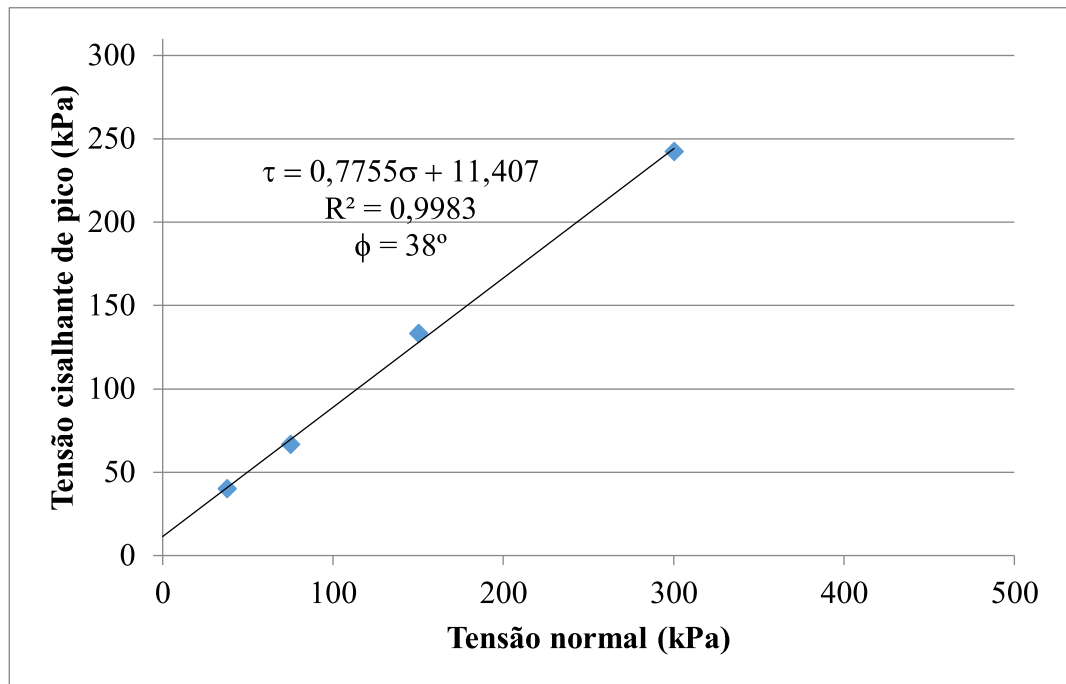
Figura 73 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI6



4.9 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 09 – GI9

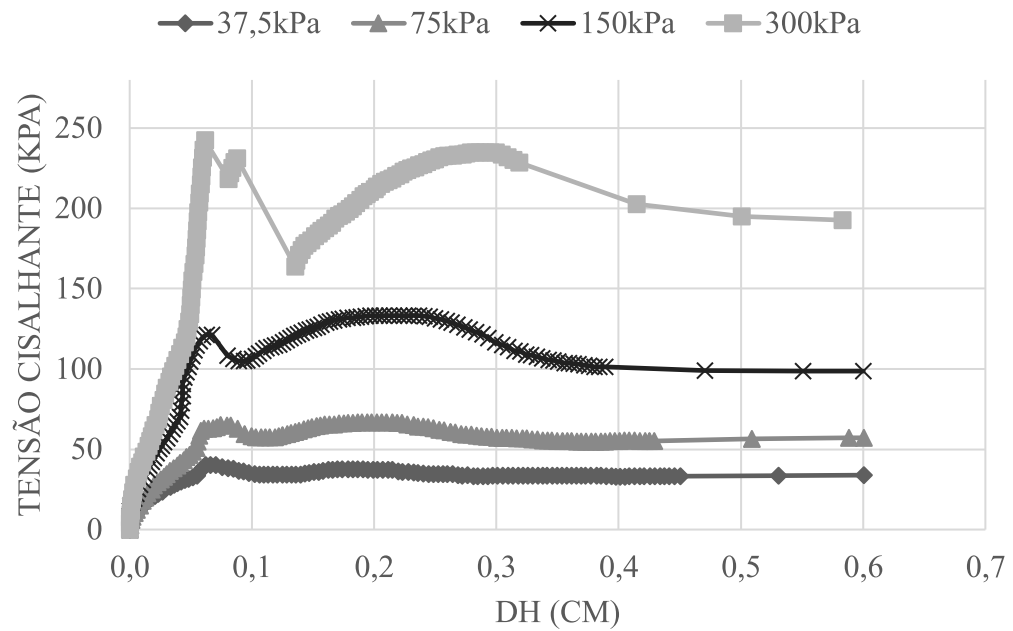
Para esta interface, os resultados continuam próximos aos encontrados anteriormente. Para este caso, o ângulo de atrito de pico obtido foi $(\phi_p) = 38^\circ$ e a adesão aparente $(a) = 11,4\text{kPa}$ (Figura 74).

Figura 74 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia - GI9



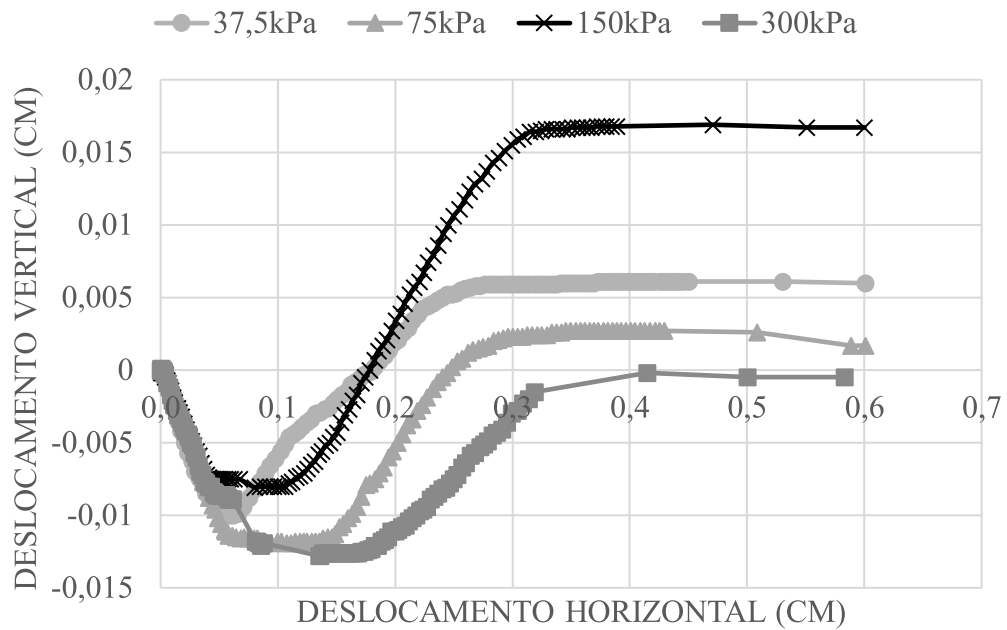
Seguindo para a análise da tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, a Figura 75 mostra que, para esta interface, continua o mesmo comportamento de pico nítido para as tensões mais altas, seguido de uma queda e aumento da tensão até que se chegue na condição residual, indicando uma possível ruptura localizada, por conta do possível galgamento mencionado anteriormente.

Figura 75 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI9



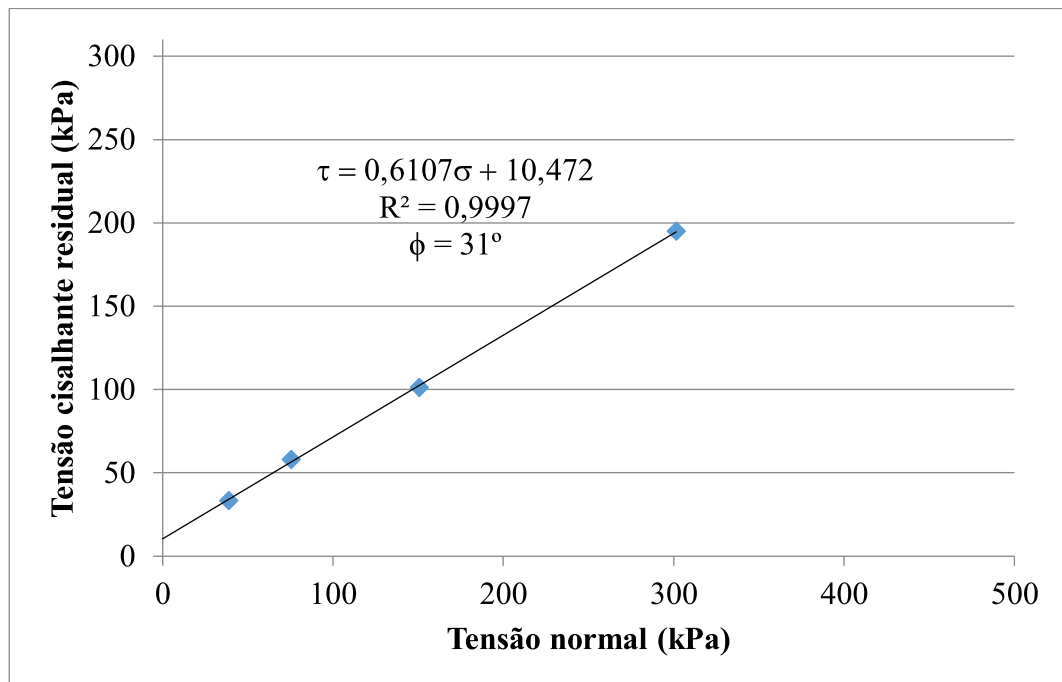
A seguir, observa-se o fenômeno da dilatância, em que, para todos os corpos de prova ensaiados, ocorreu uma diminuição do volume inicialmente e depois o aumento de volume (Figura 76), sendo importante para a mobilização da resistência ao cisalhamento, pois o aumento de volume colabora para o aumento da resistência.

Figura 76 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI9



Na condição residual, o ângulo de atrito diminuiu, considerando a condição de pico, para 31° , e a adesão aparente diminuiu para 10,5kPa (Figura 77). Neste caso, fica o alerta para a análise residual, pois a interface teve a sua resistência comprometida devido à diminuição tanto do ângulo de atrito quanto da adesão.

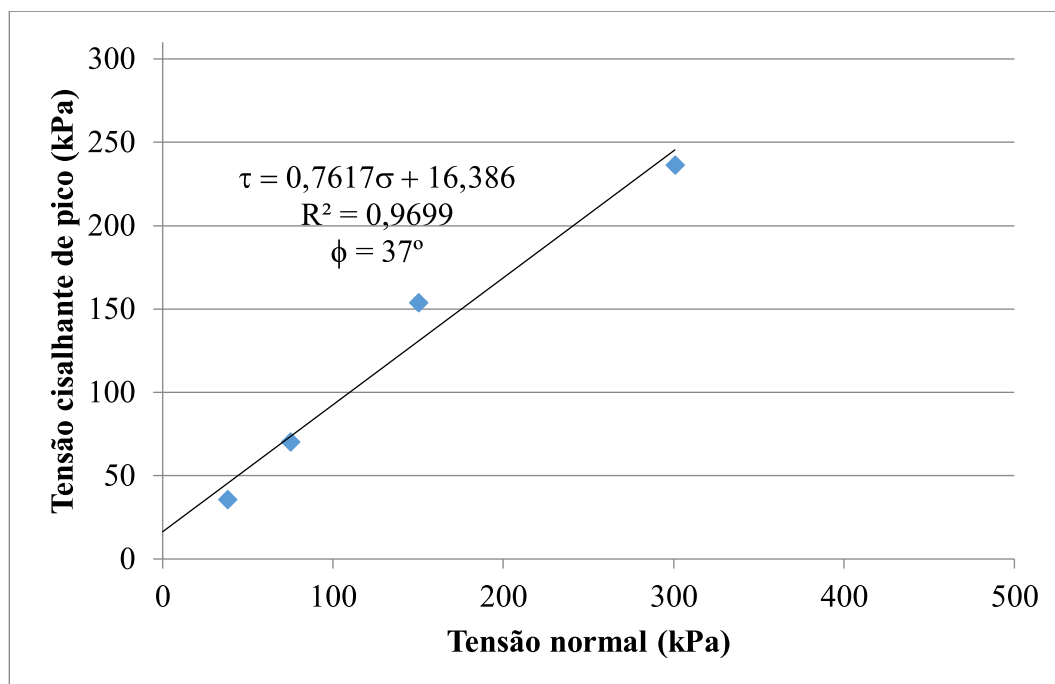
Figura 77 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI9



4.10 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE INTERFACE AREIA-GEOMEMBRANA IMPRESSA 12 – GI12

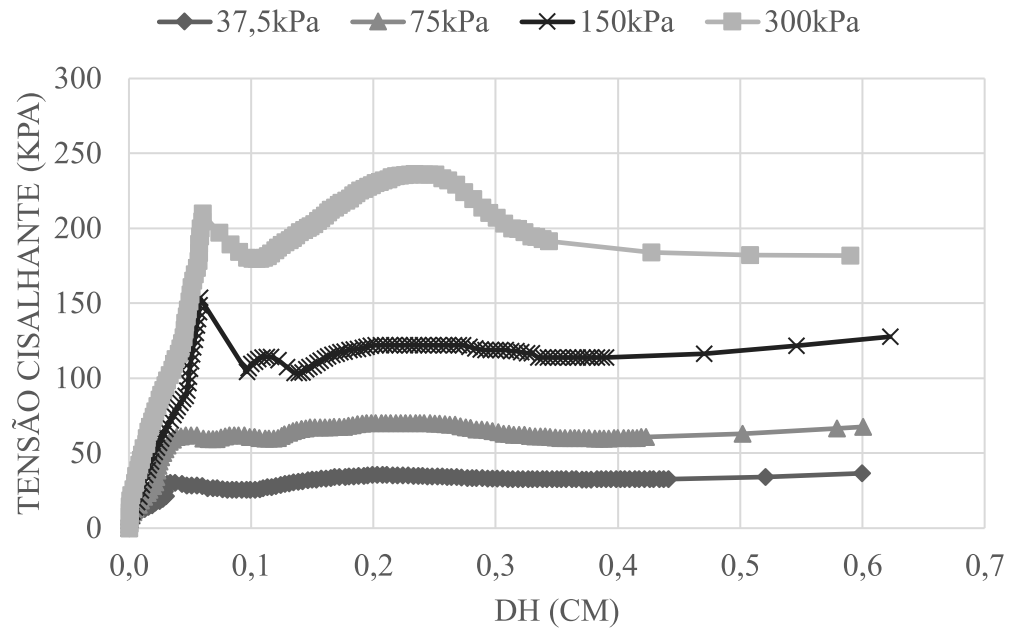
Esta interface apresentou um ângulo de atrito de pico um pouco menor do que os outros casos, mas, em compensação, foi a que recebeu um aumento considerável da adesão em relação às outras interfaces, trazendo maior segurança em relação ao deslizamento. A Figura 78 mostra que, para esta envoltória, foram encontrados o ângulo de atrito de pico (ϕ_p) = 37° e a adesão aparente (a) = 16,4 kPa.

Figura 78 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de pico da interface areia- GI12



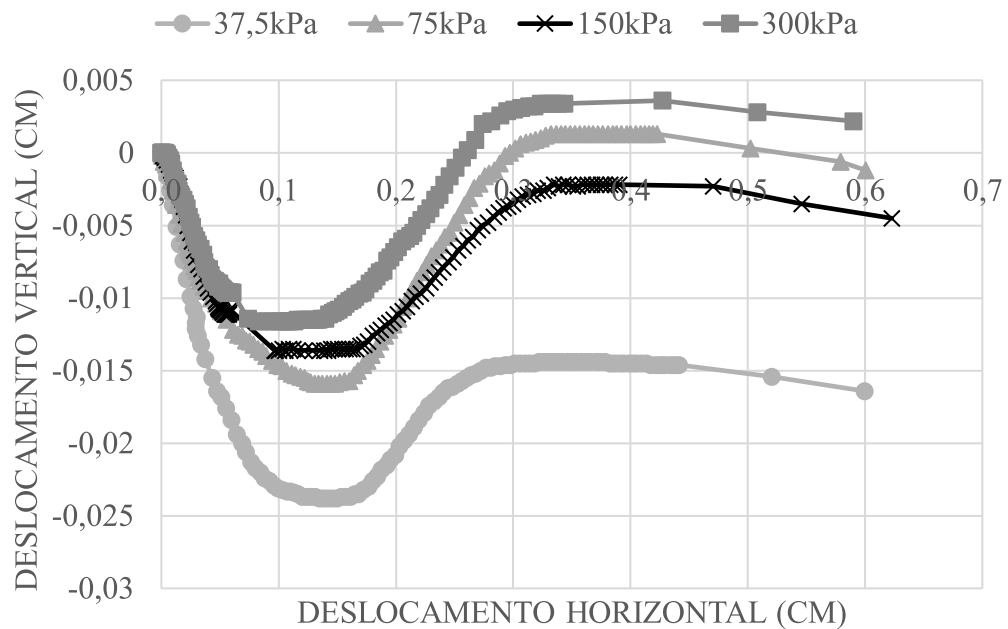
Para o gráfico de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal desta interface, nota-se um comportamento semelhante aos casos anteriores, pois há um pico nítido para as tensões maiores, uma queda da tensão e um novo aumento até chegar na condição residual, apresentando uma possível ruptura localizada seguida de um rearranjo das partículas de areia, levando a um incremento da resistência (Figura 79). Vale lembrar que o valor considerado para a tensão cisalhante máxima foi o de maior valor numérico encontrado pelas planilhas de cálculos de cada ensaio.

Figura 79 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI12



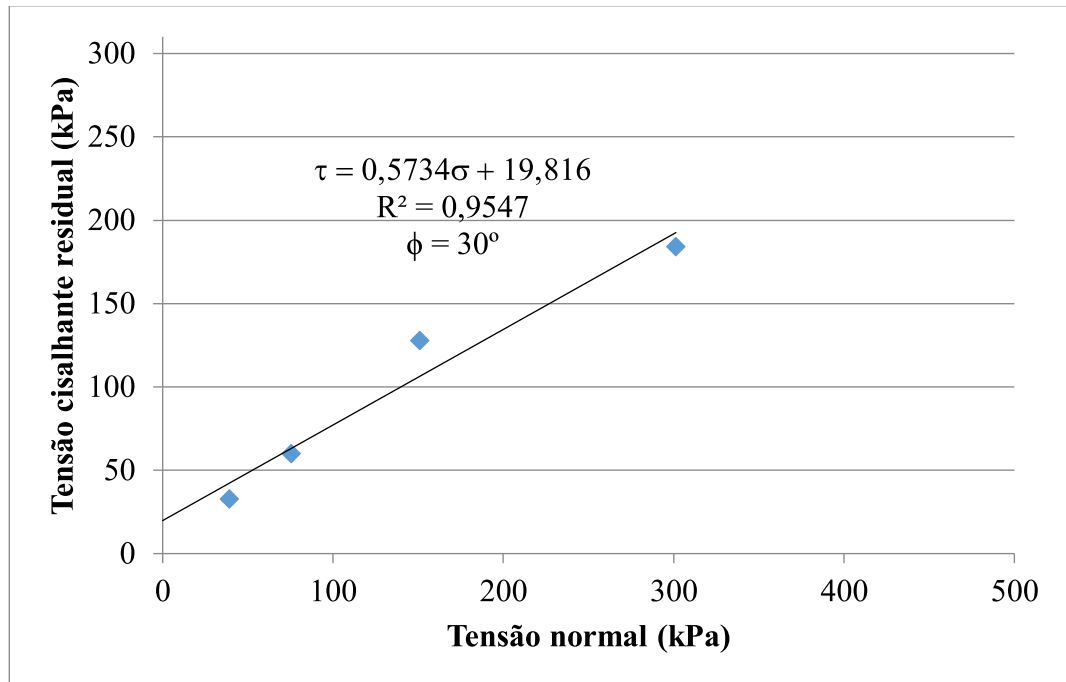
A curva de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal apresenta uma diminuição do volume no início do cisalhamento, seguida de um aumento de volume ao longo do ensaio, o que indica o comportamento dilatante (Figura 80).

Figura 80 – Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para a interface areia - GI12



Finalmente, ao avaliar a condição de resistência ao cisalhamento residual, percebe-se uma diminuição do ângulo de atrito e aumento da adesão, em relação a envoltória de pico. A Figura 81 indica um ângulo de atrito de 30° e uma adesão aparente de 19,8kPa. Esta interface apresentou melhoria da adesão para a condição residual, o que pode indicar aumento da resistência ao cisalhamento, o que será discutido no próximo capítulo.

Figura 81 - Envoltória de resistência ao cisalhamento residual para a interface areia - GI12



5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE INTERFACES

Nesta seção, serão apresentadas as comparações entre resultados, considerando as condições de pico e residual e também cada tensão normal aplicada para os diferentes tipos de interfaces estudados. Essas comparações foram feitas em todos os casos, considerando os resultados das médias das envoltórias.

5.1 ENVOLTÓRIAS PARA A CONDIÇÃO DE PICO

No Quadro 2, é feita uma comparação da tensão cisalhante de cada interface na condição de pico em relação ao resultado obtido pelo solo puro, com o objetivo de avaliar se ocorreu melhoria ou prejuízo com a inserção da geomembrana.

Quadro 2 - Resultados para a condição de pico

Material ensaiado	σ (kPa)	σ (kPa) corrigida	ϕ (°)	c/a aparente (kPa)	$\tau_{\text{interface}}$ (kPa)	$\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$
AP	37,5	38,3	42	0	34,5	1
	75	75,2			67,7	
	150	151,1			136,0	
	300	301,1			271,0	
GL	37,5	38,3	33	0	24,9	0,72
	75	75,2			48,9	0,72
	150	150,1			97,6	0,72
	300	301,0			195,7	0,72
GT1A	37,5	38,5	38	4,8	34,8	1,01
	75	75,2			63,5	0,94
	150	150,3			122,0	0,90
	300	300,7			239,3	0,88
GT1F	37,5	38,3	40	3,8	36,0	1,04
	75	75,2			67,0	0,99
	150	150,5			130,2	0,96
	300	300,8			256,5	0,95
GT2	37,5	38,3	40	1,3	33,5	0,97
	75	75,2			64,5	0,95
	150	150,7			127,9	0,94
	300	300,8			254,0	0,94
GT3	37,5	38,3	40	4,8	37,0	1,07
	75	75,1			67,9	1,00
	150	150,4			131,1	0,96
	300	300,8			257,5	0,95
GIL	37,5	38,9	33	0	25,3	0,73
	75	75,1			48,7	0,72
	150	150,1			97,6	0,72
	300	300,2			195,1	0,72

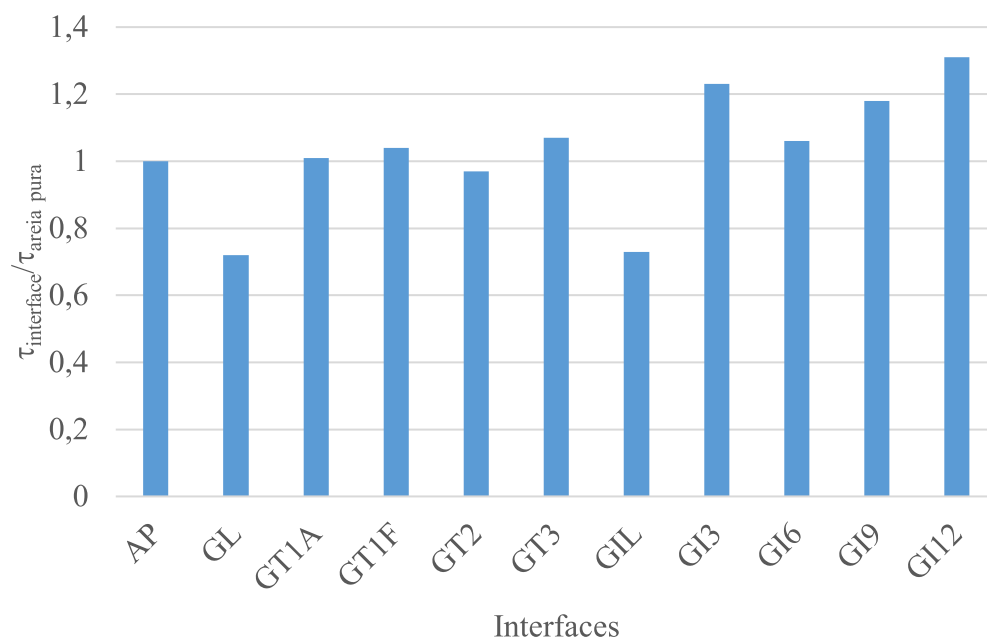
GI3	37,5	38,3	38	9,0	38,9	1,23
	75	75,0			67,5	1,00
	150	150,3			126,2	0,93
	300	300,3			243,2	0,90
GI6	37,5	38,2	38	6,7	36,5	1,06
	75	75,2			65,4	0,97
	150	150,1			123,8	0,91
	300	300,7			241,2	0,89
GI9	37,5	37,7	38	11,4	40,8	1,18
	75	75,1			70,0	1,03
	150	150,3			128,6	0,95
	300	300,2			245,5	0,91
GI12	37,5	38,3	37	16,4	45,1	1,31
	75	75,1			72,7	1,07
	150	150,1			129,0	0,95
	300	300,7			241,9	0,89

Nota: c: coesão; a: adesão.

É importante destacar que, como a diferença da tensão normal aplicada com a tensão normal corrigida é muito pequena, é possível fazer uma comparação dos resultados tendo como base a tensão normal aplicada. A tensão normal nominal de 37,5 kPa, por exemplo, apresentou variação máxima de 3,7% em relação ao valor corrigido, sendo este o maior desvio registrado entre todas as tensões. Por isso, trata-se de diferença de pequena magnitude, compatível com as tolerâncias do procedimento experimental e sem impacto relevante nas análises realizadas.

Os gráficos das Figuras 82, 83, 84 e 85 apresentam, para cada nível de tensão normal ensaiado, os correspondentes valores de $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$, para a condição de pico.

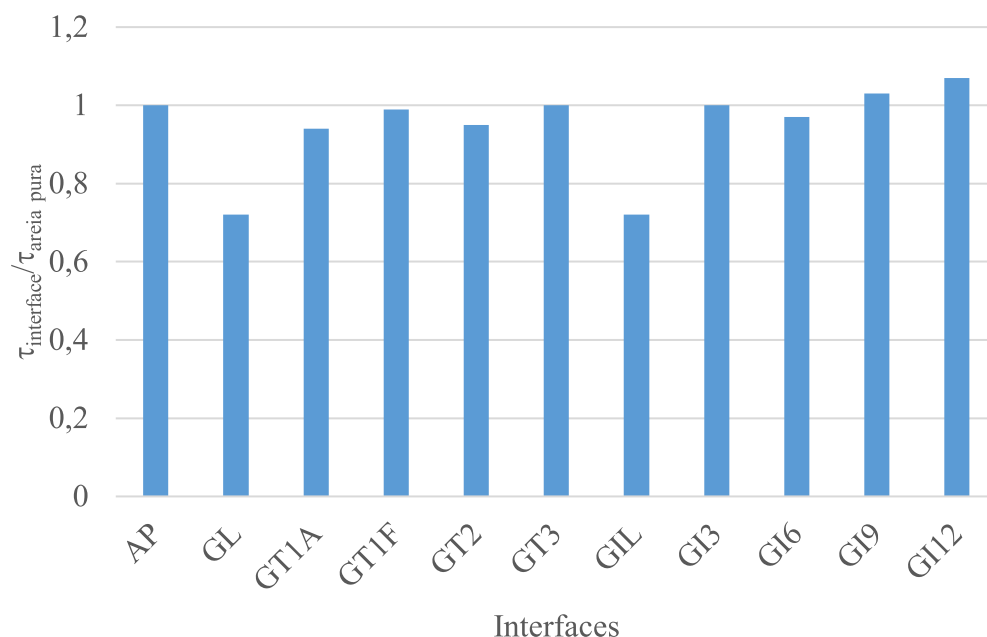
Figura 82 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 37,5kPa



De acordo com Chen et al. (2025), é esperado que a tensão cisalhante da interface seja inferior à tensão cisalhante do solo puro, pois há um potencial de ruptura na interface. Porém, como visto na Figura 80, para pequenas tensões normais, como a de 37,5kPa, todas as interfaces com geomembranas texturizadas apresentam tensão cisalhante semelhante à da areia pura. A GT2 obteve valor inferior ao da areia, e a GT3 foi a que apresentou melhor resultado dentro das comerciais. A geomembrana lisa diminui muito a resistência, como já era esperado, atingindo apenas 72% do que a areia pura consegue resistir.

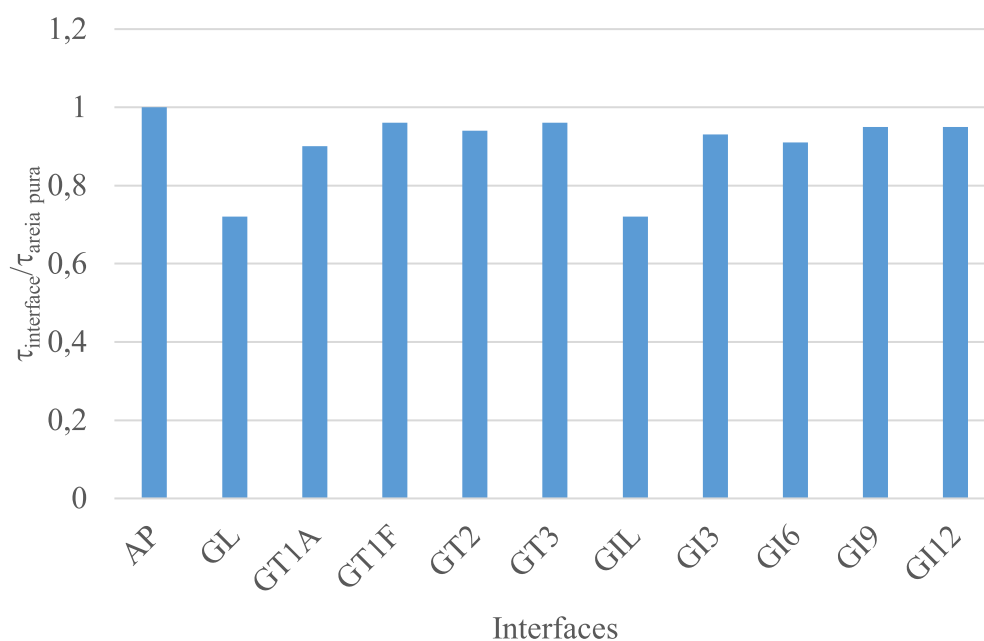
Para esta tensão mais baixa, todas as geomembranas impressas apresentaram resultados superiores aos da areia pura e das geomembranas comerciais, o que mostra uma oportunidade de utilização destas novas geomembranas em aterros de cobertura, por exemplo, pois recebem tensões mais baixas. Ressalta-se que este resultado maior que 1 é um indicativo de um possível fator de segurança e não um aumento de resistência, pois neste caso, possivelmente, a ruptura ocorreria na própria areia.

Figura 83 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 75kPa

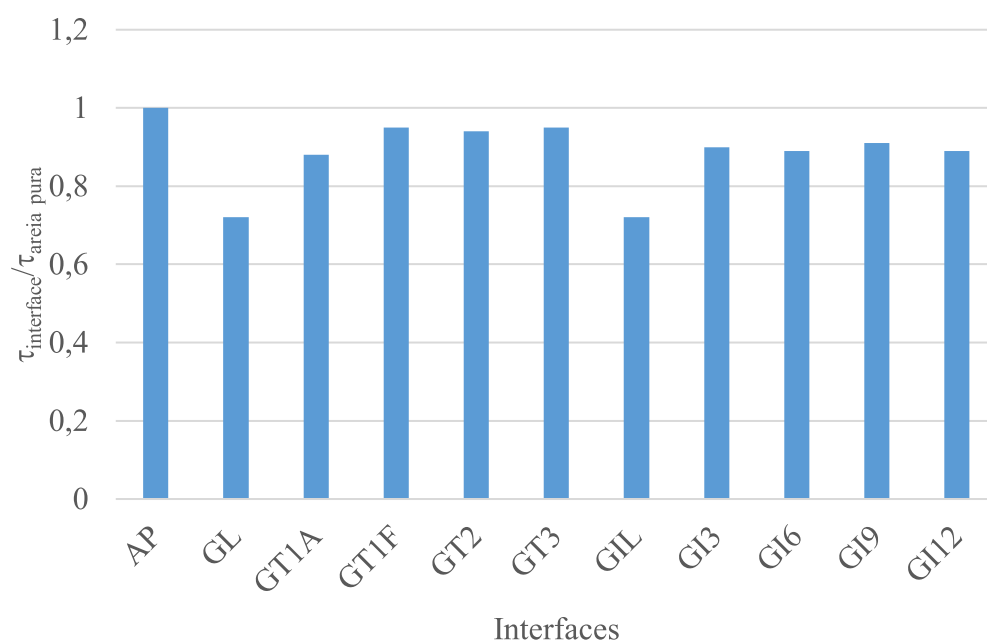


Estudos experimentais de cisalhamento direto mostram que o ângulo de atrito da interface tende a diminuir à medida que a tensão normal aumenta, indicando menor desempenho relativo da interface sob maiores carregamentos (Fleming et al., 2006).

Para este caso, com o aumento da tensão, as geomembranas começam a diminuir a resistência em comparação com a areia pura. Porque a medida em que se aumenta a tensão, diminuiu a liberdade de movimentação das partículas, e como consequência, diminui a dilatação, fator importante para a resistência. Aqui, a GT3, GI3, GI9 e GI12 apresentam valores iguais ou superiores à resistência da areia pura.

Figura 84 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 150kPa

Considerando a tensão de 150kPa, todas as interfaces apresentam valores inferiores à resistência da areia. Porém, todas as geomembranas texturizadas, sendo comerciais e texturizadas, obtiveram valores a partir de 90% da resistência da areia pura.

Figura 85 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (pico) – Tensão normal inicial de 300kPa

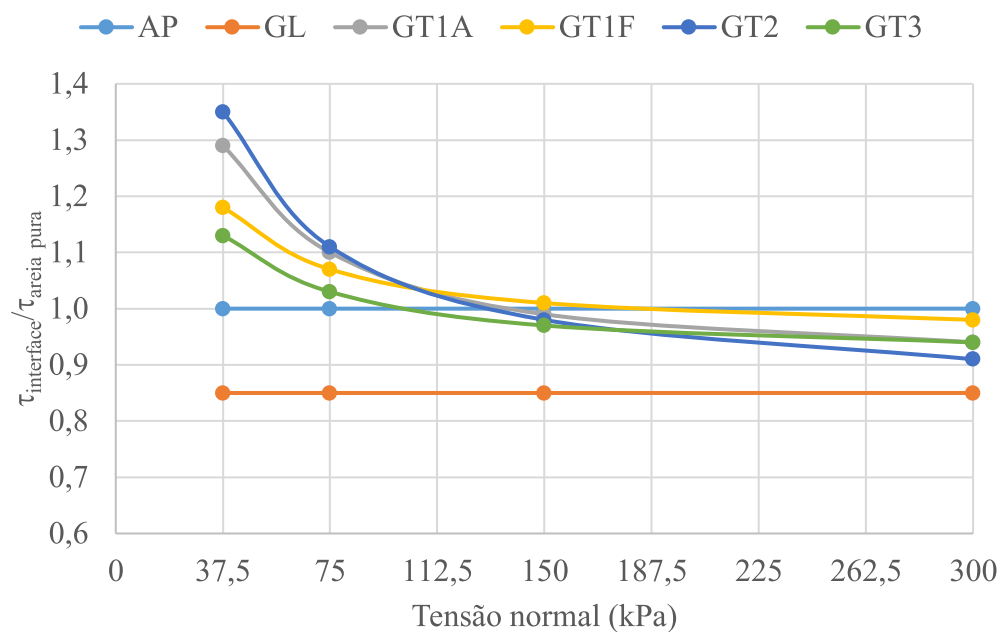
Com o aumento da tensão normal aplicada, os valores não tiveram grandes alterações. Todas as geomembranas texturizadas ficaram próximas de 90% de resistência, incluindo também as geomembranas impressas na impressora 3D.

É importante destacar que, como o foco da utilização destas geomembranas não está relacionado com o ganho de resistência e sim para separação ou barreira de fluxo de taludes, não há impedimento da utilização das mesmas pelo fato de apresentarem uma leve diminuição da resistência ao cisalhamento. Além disso, o solo utilizado já apresenta uma boa resistência ao cisalhamento, o que traz segurança para a utilização com o geossintético.

Para esta análise de comparação de resistências para a condição de pico, as melhores opções de interfaces das geomembranas comerciais foram com a utilização da GT1F e GT3. Para as geomembranas impressas, a melhor opção foi a GI12, principalmente, quando se considera as tensões normais mais baixas, como 37,5 e 75kPa. Este resultado está em concordância com o que Bacas et al. (2015) relatam em seu estudo, pois, de acordo com estes autores, as geomembranas com asperidades mais próximas, ou seja, com menor espaçamento, apresentaram maiores valores de resistência de pico e pós-pico ao cisalhamento do que aquelas com asperidades mais afastadas.

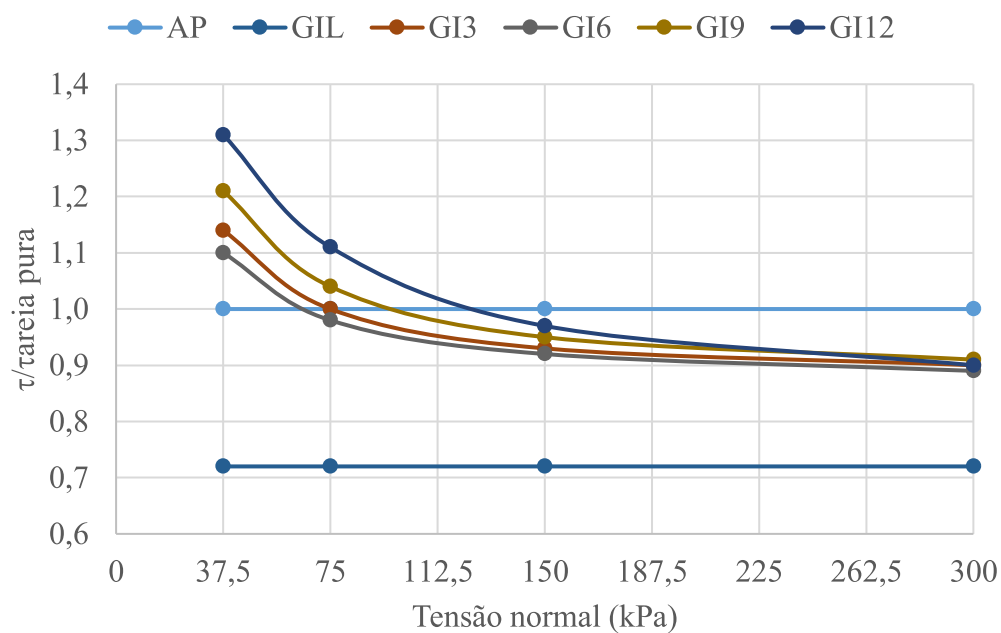
A seguir, na Figura 86, é apresentada a relação de tensão cisalhante de cada interface em relação à tensão normal aplicada. É possível observar que, para tensões menores, como 37,5kPa, a relação $\tau_{interface}/\tau_{areia\ pura}$ tende a ser um pouco maior, mas o aumento da tensão normal não gera grandes alterações. Neste gráfico, fica evidente a menor contribuição da tensão cisalhante para a interface com geomembrana lisa.

Figura 86 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – geomembranas comerciais - condição de pico



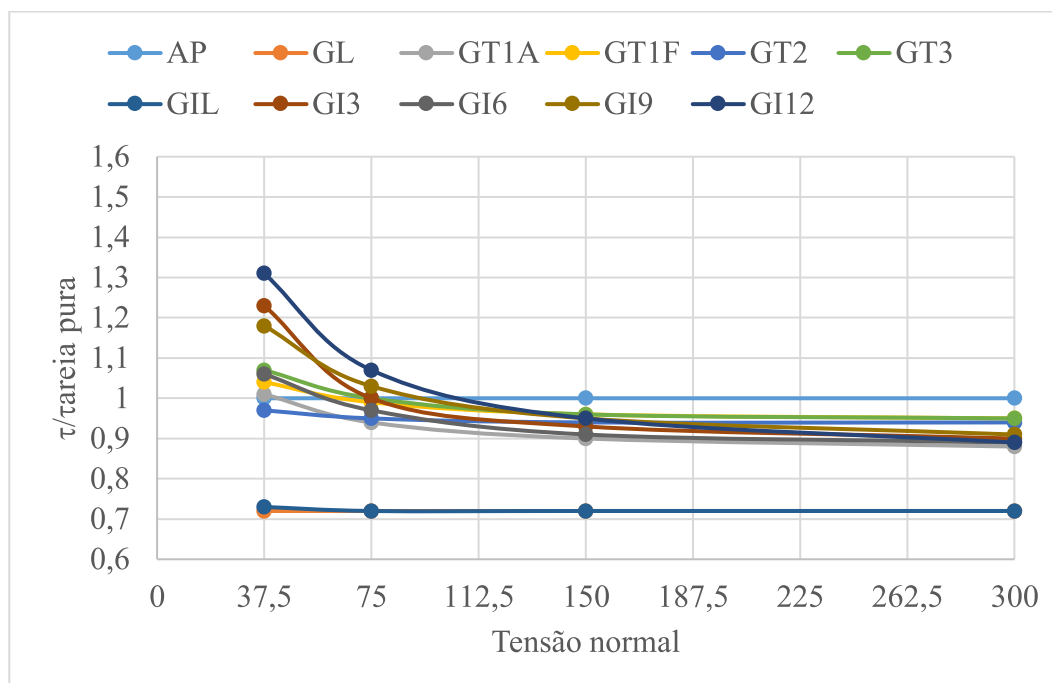
Na Figura 87, tem-se a comparação dos resultados considerando as novas geomembranas impressas. Observa-se a melhor contribuição da GI12, principalmente, para baixas tensões normais.

Figura 87 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial - geomembranas impressas - condição de pico



A seguir, na Figura 88, é apresentada a relação de tensão cisalhante de cada interface em relação à tensão normal aplicada para todas as interfaces comerciais e impressas.

Figura 88 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial - todas interfaces - condição de pico



De maneira geral, observa-se um comportamento esperado em todos os ensaios realizados, em que as interfaces acabam apresentando valores inferiores em termos de resistência ao cisalhamento de pico em comparação com o solo puro, conforme já discutido em trabalhos como o de Chen et al. (2025). Entretanto, para baixas tensões normais, há um leve incremento da resistência com a inserção das geomembranas texturizadas.

O melhor resultado para baixas tensões normais, considerando todos os ensaios realizados, foi o da interface com a GI12, que é a que possui mais ranhuras e menor espaçamento entre elas. É interessante ressaltar que esse resultado mostra uma boa oportunidade de utilização deste tipo de geomembrana impressa, tendo em vista o melhor desempenho em comparação com as geomembranas comerciais apresentadas.

5.2 ENVOLTÓRIAS PARA A CONDIÇÃO RESIDUAL

Através dos mesmos critérios já discutidos, foram estabelecidas as relações de tensão cisalhante de cada interface em relação à tensão cisalhante da areia pura para as envoltórias na condição residual (Quadro 3).

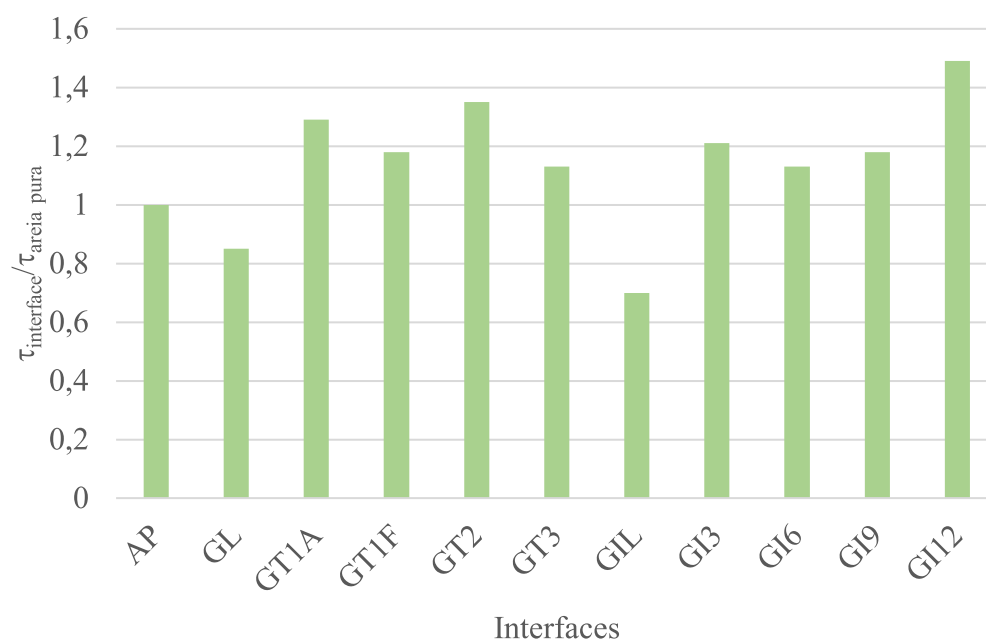
Quadro 3 - Resultados para a condição residual

Material ensaiado	σ (kPa)	σ (kPa) corrigida	ϕ (°)	c/a aparente (kPa)	$\tau_{\text{interface}}$ (kPa)	$\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$
AP	37,5	39,0	36	0	28,5	1
	75	75,3			55,0	
	150	151,2			110,4	
	300	302,2			220,6	
GL	37,5	39,0	32	0	24,2	0,85
	75	75,3			46,7	0,85
	150	150,7			93,4	0,85
	300	302,0			187,2	0,85
GT1A	37,5	39,1	33	11,5	36,9	1,29
	75	75,3			60,4	1,10
	150	150,6			109,4	0,99
	300	301,2			207,3	0,94
GT1F	37,5	39,1	35	6,3	33,7	1,18
	75	75,4			59,1	1,07
	150	150,7			111,8	1,01
	300	301,4			217,3	0,98
GT2	37,5	39,0	32	14,2	38,4	1,35
	75	75,3			60,9	1,11
	150	150,8			107,7	0,98
	300	301,5			201,1	0,91
GT3	37,5	39,0	34	6,1	32,2	1,13
	75	75,3			56,5	1,03
	150	150,7			107,1	0,97
	300	301,5			208,1	0,94
GIL	37,5	39,0	27	0	19,9	0,70
	75	75,3			38,4	0,70
	150	150,6			76,8	0,70
	300	301,3			153,7	0,70
GI3	37,5	39,0	34	8,5	34,6	1,21
	75	75,3			58,9	1,07
	150	150,6			109,4	0,99
	300	301,5			202,0	0,91
GI6	37,5	38,6	32	8,2	32,1	1,13
	75	75,3			54,9	1,00
	150	150,7			101,6	0,92
	300	301,5			195,1	0,88
GI9	37,5	38,6	31	10,5	33,7	1,18
	75	75,2			55,6	1,01
	150	150,6			100,9	0,91
	300	301,5			191,4	0,87
GI12	37,5	39,0	30	19,8	42,4	1,49
	75	75,3			63,5	1,15
	150	150,9			107,3	0,97

	300	301,3			194,5	0,88
--	-----	-------	--	--	-------	------

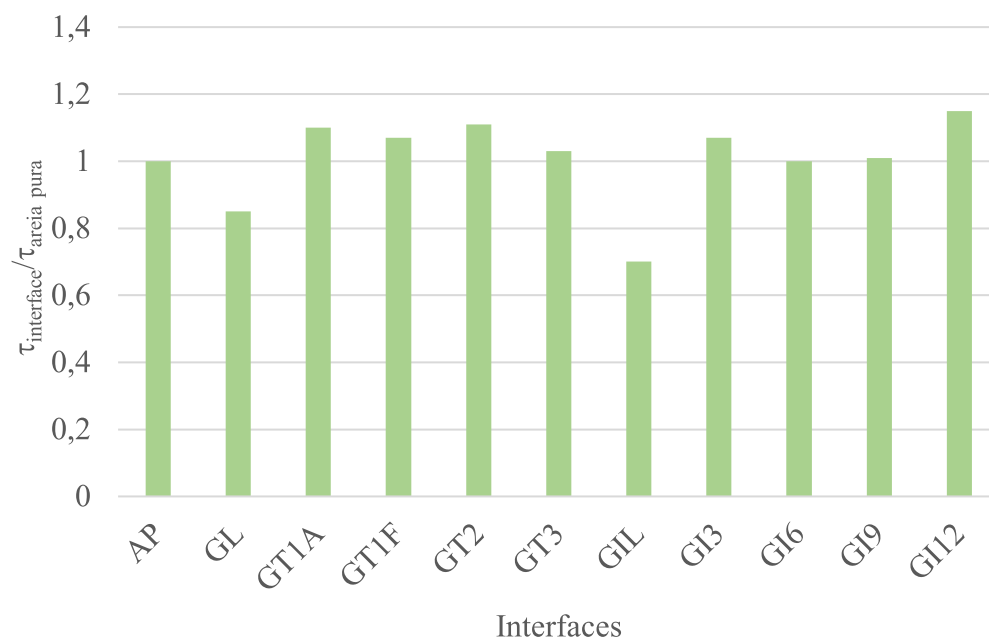
Os gráficos das Figuras 89, 90, 91 e 92 apresentam, para cada nível de tensão normal ensaiado, os correspondentes valores de $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$, para a condição residual.

Figura 89 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 37,5kPa

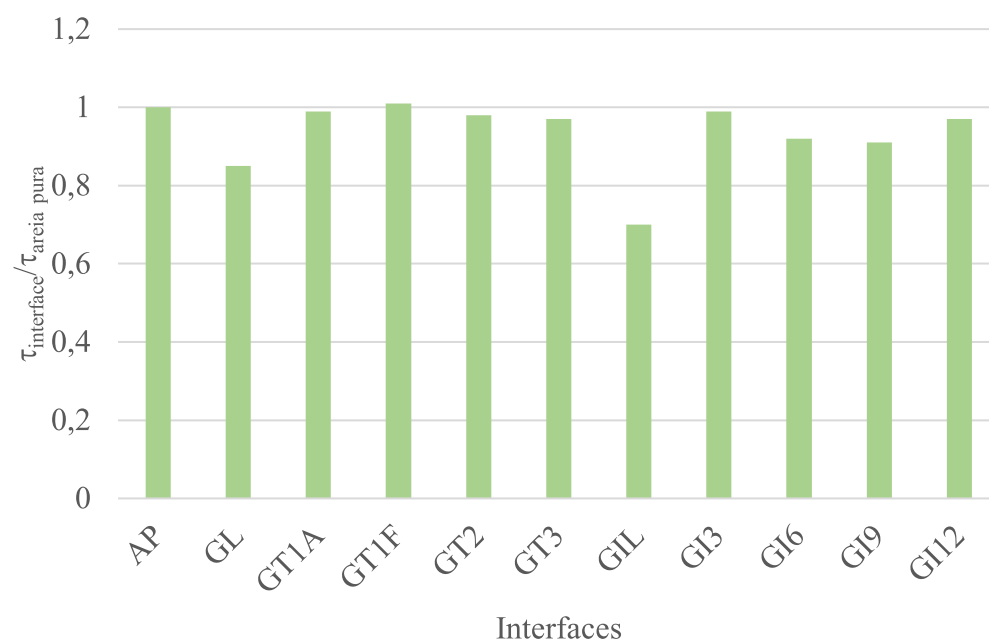


Assim como na condição de pico, para a condição residual, todas as interfaces com geomembranas texturizadas apresentam um bom comportamento para baixas tensões normais, como a de 37,5kPa, pois todas ficaram com resistência superior à da areia pura. A geomembrana lisa comercial apresentou uma melhora no desempenho para a condição de tensão residual, passando a ter 85% da resistência da areia pura. Já para a geomembrana lisa impressa, ocorreu uma leve diminuição em comparação com a condição de pico, visto que a GIL teve 70% da resistência da areia pura. Deve-se destacar o bom desempenho das geomembranas impressas para esta análise, em especial para a GI12, que aumenta em quase 50% o valor de resistência da areia pura.

Figura 90 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 75kPa

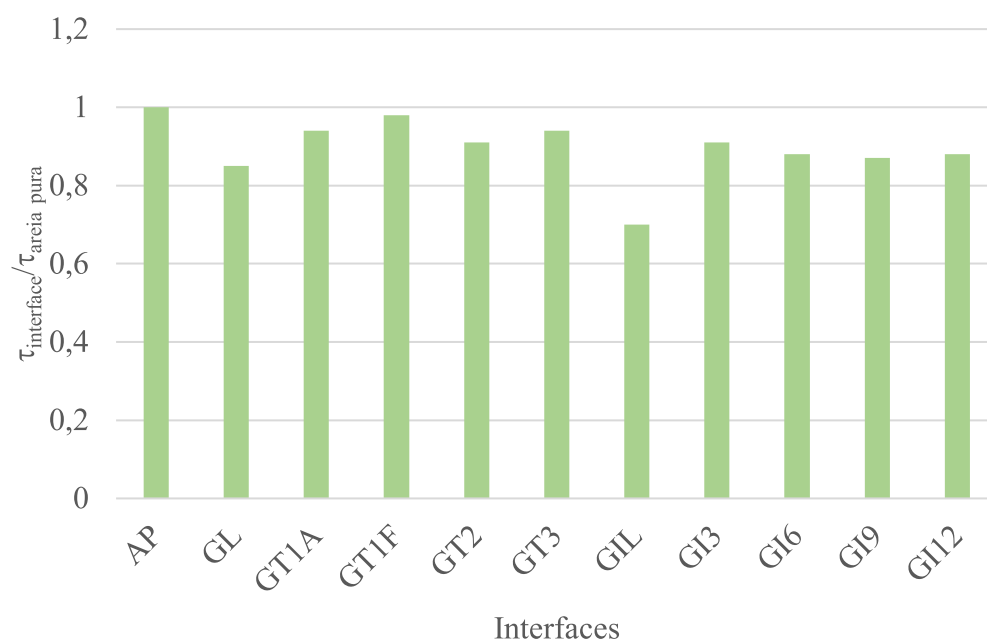


Para a tensão normal aplicada de 75kPa, as interfaces texturizadas tiveram resultados muito próximos aos da areia pura. Considerando as novas geomembranas que foram impressas, destaca-se, novamente, a GI12, que apresentou um desempenho 15% superior ao da areia, além de estar acima dos resultados das outras geomembranas texturizadas. Esses resultados, mostram um comportamento semelhante ao visto para a condição de pico, em termos de queda de resistência em comparação com a areia, à medida em que se aumenta a tensão normal aplicada.

Figura 91 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 150kPa

Conforme visto anteriormente, com o aumento da tensão normal aplicada, é natural que diminua a resistência ao cisalhamento de interface dos corpos de prova ensaiados. Para a tensão normal de 150kPa, todas as interfaces com geomembranas texturizadas apresentaram um bom desempenho, pois estão acima de 90% da resistência ao cisalhamento da areia pura para essas mesmas condições.

Figura 92 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ (residual) – Tensão normal inicial de 300kPa

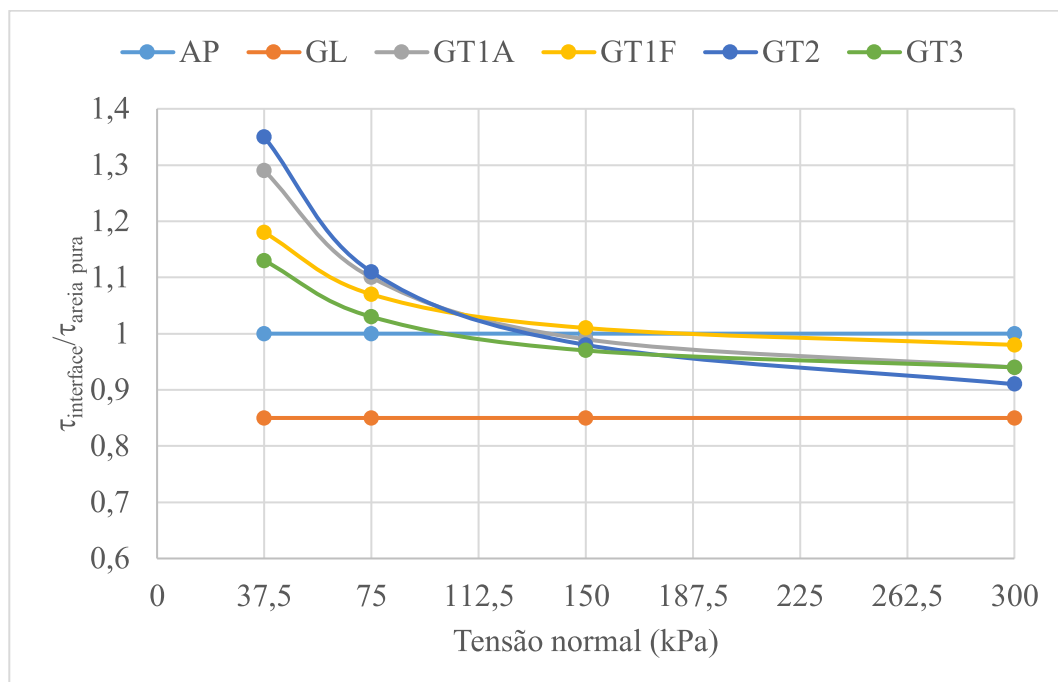


A partir destas tensões normais mais altas, as geomembranas impressas começam a perder em termos de resistência para as geomembranas comerciais. É interessante destacar que, para a tensão normal de 300kPa, o aumento de aspereza e, conseqüentemente, a diminuição do espaçamento não foram benéficos para o ganho de resistência, sendo a GI3 a que apresentou o melhor resultado neste sentido.

Em tensões normais elevadas, o efeito benéfico de texturas muito altas e densas pode diminuir, pois o confinamento reduz a dilatância e pode provocar deformação ou desgaste das asperidades. Nessa condição, a resistência da interface passa a ser menos controlada pelo intertravamento geométrico e mais pelo atrito sob compressão. Assim, geomembranas com rugosidade moderada e maior espaçamento entre asperidades podem apresentar desempenho semelhante ou até superior sob altos níveis de tensão normal (Bacas et al., 2015).

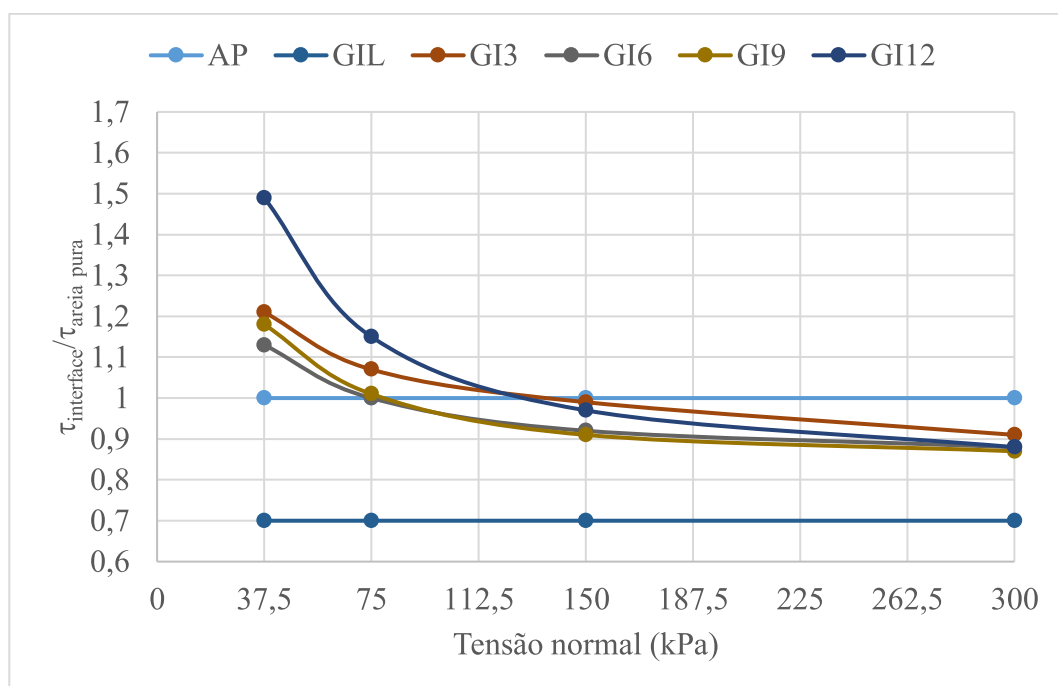
Para a condição residual, é possível identificar uma variação um pouco maior da relação $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ para os diferentes tipos de interface (Figura 93). Assim como na condição de pico, os maiores valores estão nas tensões normais mais baixas. É importante destacar que, para a tensão normal de 37,5kPa, todas as interfaces texturizadas mostraram resultados superiores ao da areia pura no que se refere à tensão cisalhante residual.

Figura 93 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – geomembranas comerciais - condição residual



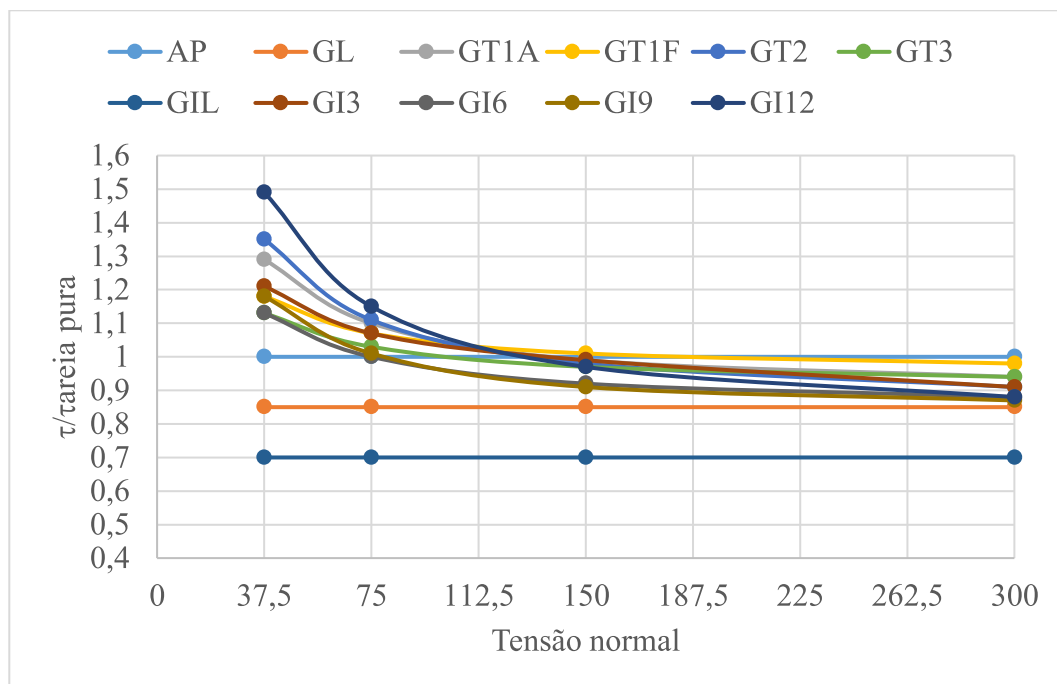
Na Figura 94, tem-se esta mesma relação, porém considerando as novas geomembranas impressas. Destaca-se, novamente, o alto desempenho da GI12 também para a condição residual em baixas tensões normais aplicadas.

Figura 94 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – geomembranas impressas - condição residual



Na Figura 95, é possível observar a relação de $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial para todas as interfaces analisadas, incluindo geomembranas comerciais e impressas, para a condição residual.

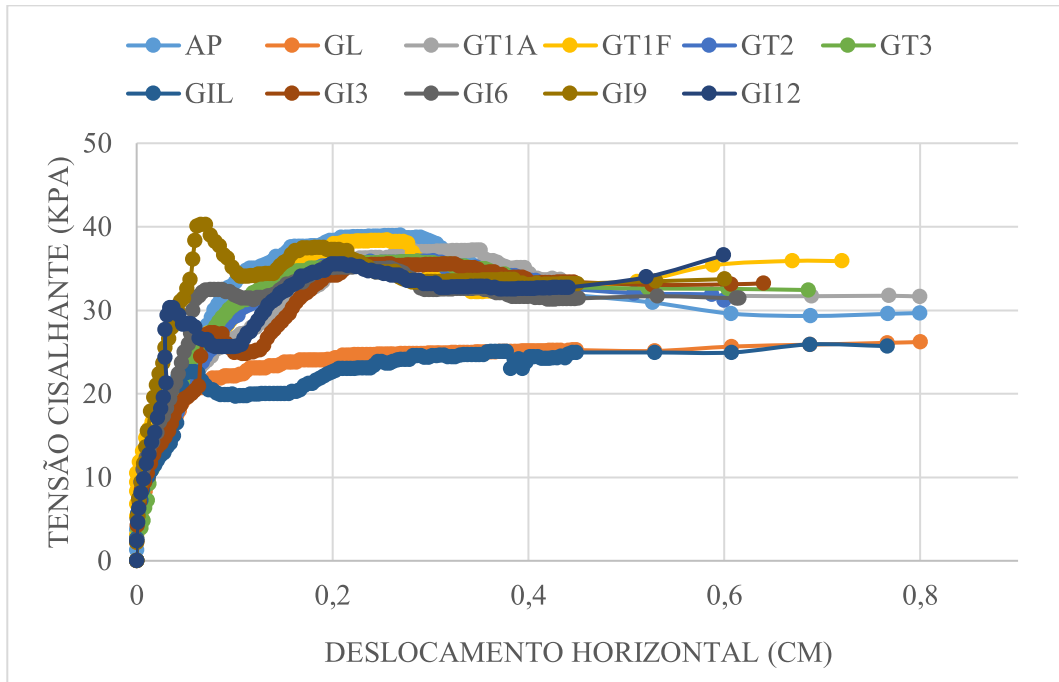
Figura 95 - $\tau_{\text{interface}}/\tau_{\text{areia pura}}$ versus tensão normal inicial – todas as interfaces - condição residual



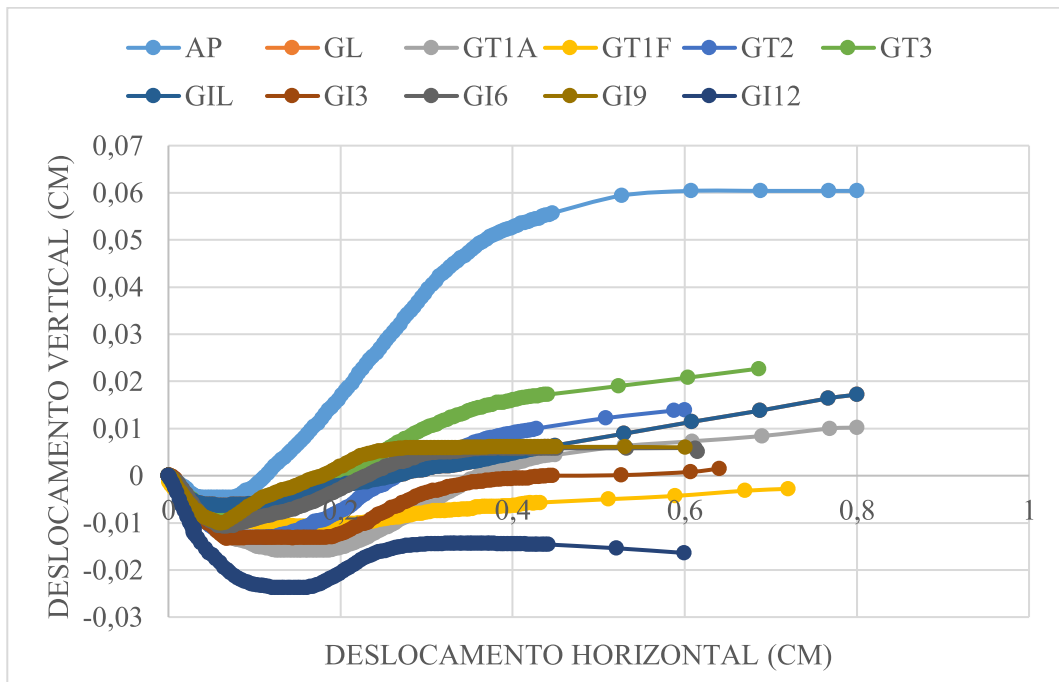
5.3 RESUMO E ANÁLISE DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

A seguir, são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto por meio das curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal agrupadas por nível de tensão normal. As figuras a seguir (96 a 99) permitem a comparação dos resultados obtidos para a areia pura, geomembranas comerciais e geomembranas impressas.

Figura 96 – Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 37.5 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.

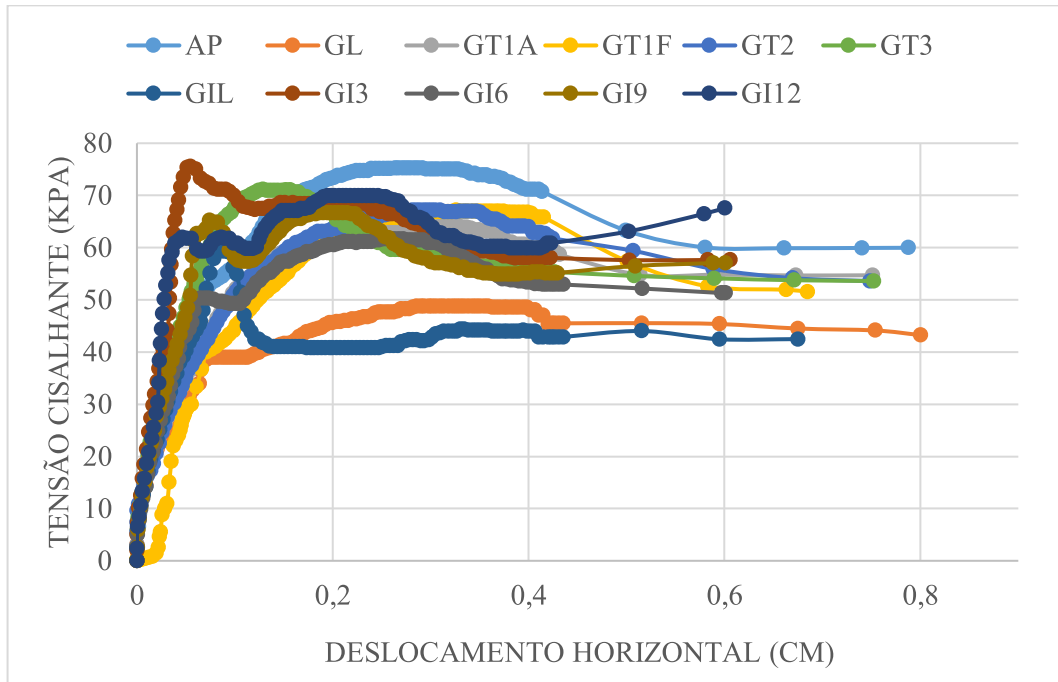


(a)

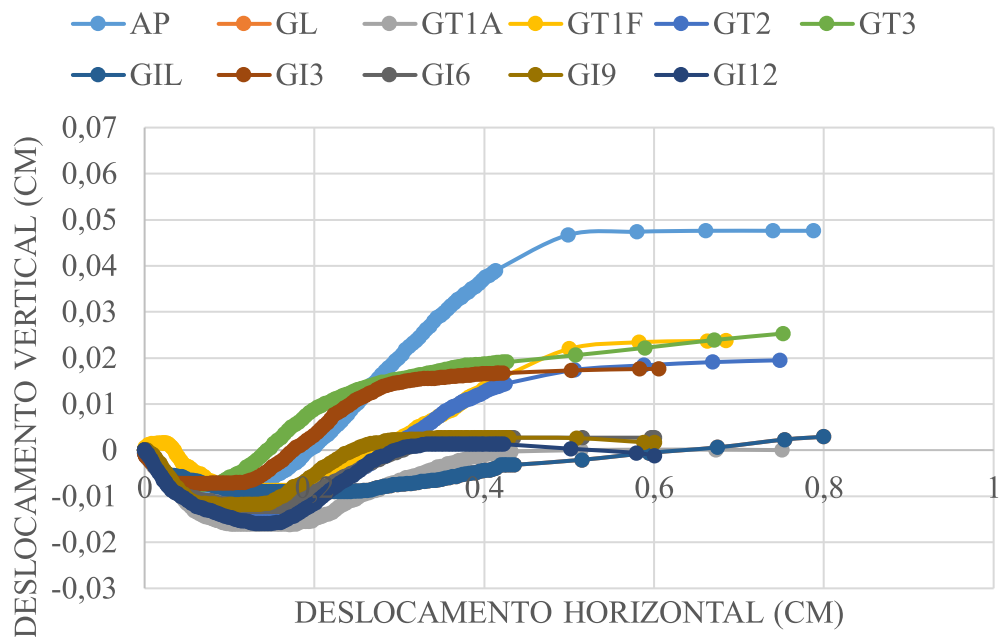


(b)

Figura 97 – Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 75 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.

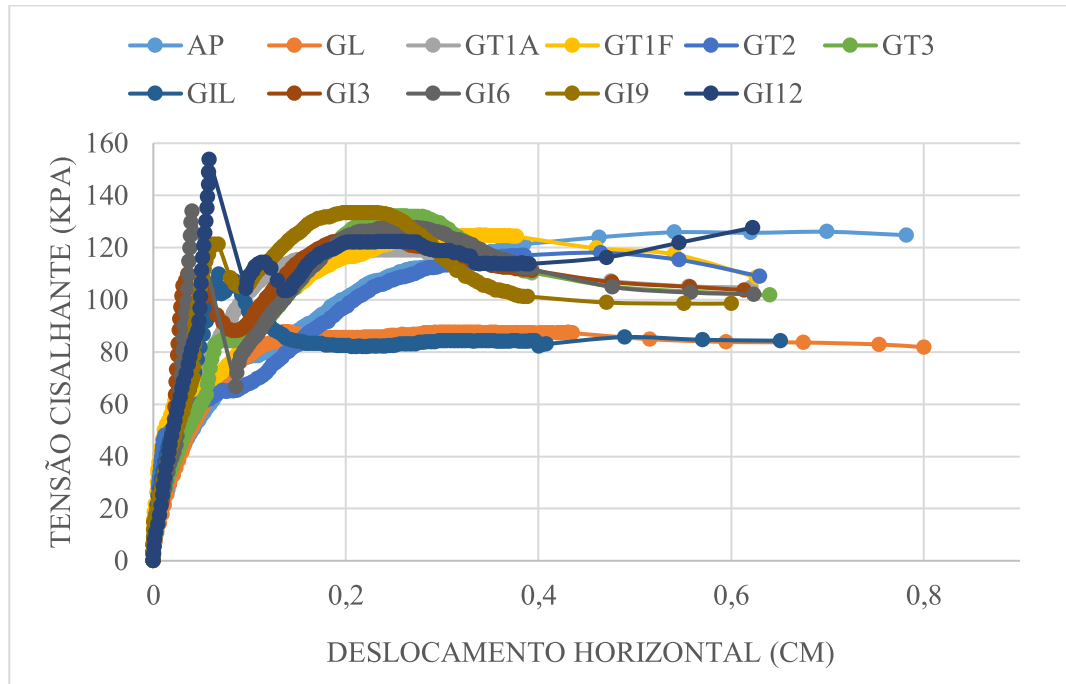


(a)

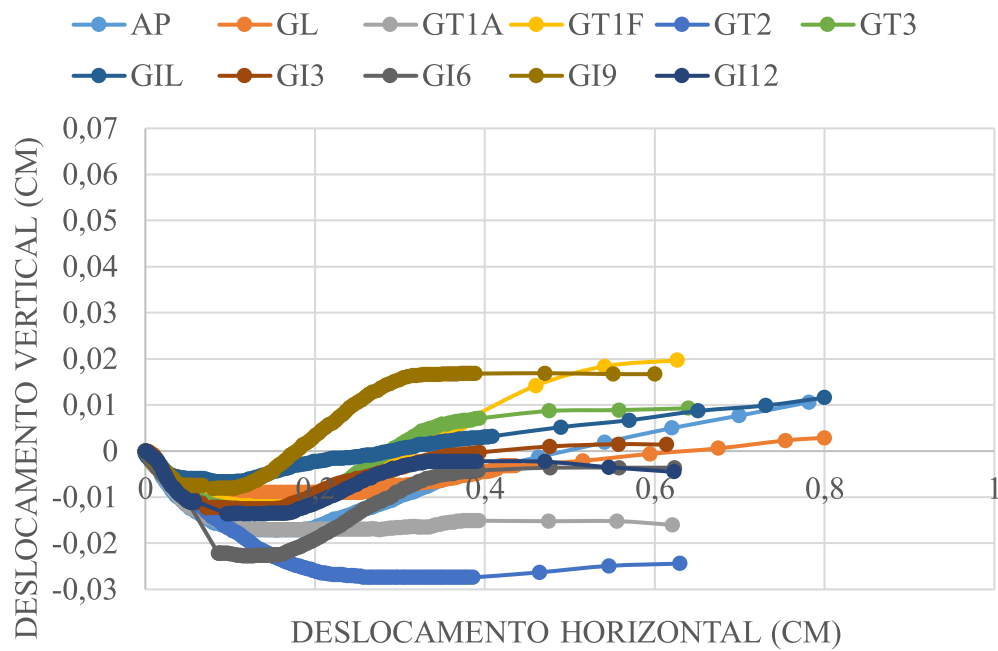


(b)

Figura 98 - Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 150 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.

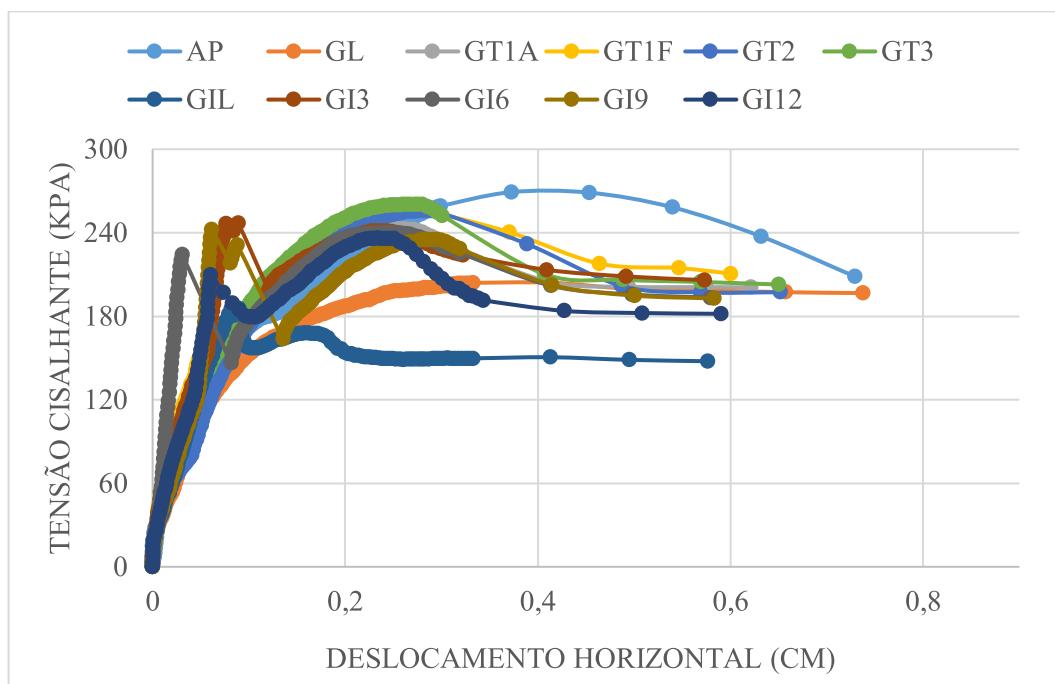


(a)

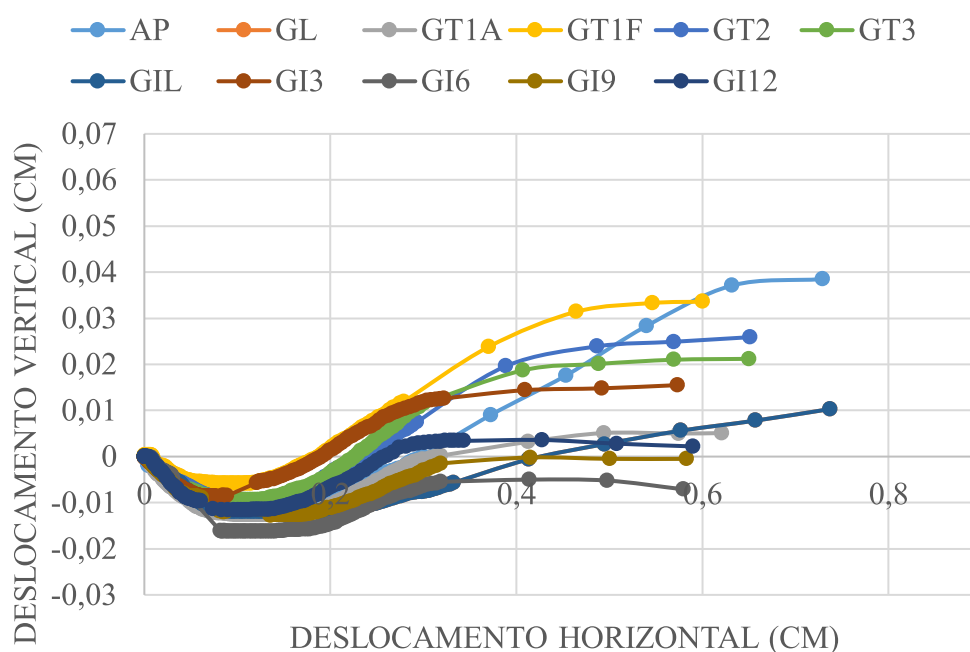


(b)

Figura 99 - Resultados obtidos para a tensão normal inicial de 300 kPa: a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; b) Deslocamento vertical versus Deslocamento horizontal.



(a)



(b)

A análise das figuras acima 94 a 97 mostra que em geral, as geomembranas lisas comerciais e impressas (GL e GIL) apresentam valores menores de tensão cisalhante em comparação com as geomembranas texturizadas para a mesma tensão normal, tendo este comportamento mais

pronunciado para as tensões de 37,5kPa, 75kPa e 150kPa. Portanto, pode ser observado que a textura da geomembrana contribuiu para o aumento da resistência ao cisalhamento de interface. Este mecanismo ocorre tanto para a condição de pico quanto para a condição residual. Em adição a isso, a textura contribuiu para maiores tensões cisalhantes residuais em comparação às geomembranas lisas. E a condição residual é a mais provável de ocorrer em campo, devido aos deslocamentos muito pequenos associados à condição de pico.

Neste contexto, a geomembrana texturizada GI12 desenvolveu maiores tensões cisalhantes pós-pico em comparação às demais geomembranas. Esse efeito pode estar relacionado ao maior número de ranhuras e consequentemente ao menor espaçamento entre cada textura.

Outras geomembranas, como GT1A, GT1F, GT2, GT3, GI3, GI6 e GI9 apresentaram valores de tensão cisalhante de pico semelhantes entre si. Na condição pós-pico (residual), essas geomembranas não exibiram um comportamento bem definido em termos de magnitude e variação da tensão normal aplicada aos corpos de prova.

Algumas geomembranas apresentaram dois picos de tensão cisalhante para as quatro tensões normais aplicadas. Em alguns casos, observa-se um primeiro pico seguido de uma queda acentuada na tensão cisalhante. Esse é o caso das geomembranas impressas GI3, GI6, GI9 e GI12. Esse comportamento não foi verificado nas geomembranas comerciais. Em aplicações práticas, esse comportamento não é esperado como um problema em relação ao uso da textura proposta, e o duplo pico pode estar associado à modificação do intertravamento entre as partículas de solo em função da geometria da textura.

De modo geral, os ensaios realizados com areia pura mostraram que, para baixas tensões normais (37,5 kPa), os valores de tensão cisalhante das geomembranas texturizadas superam a tensão cisalhante da areia pura, evidenciando aumento da resistência devido à presença da textura na condição residual. Para tensões normais intermediárias (75 kPa e 150 kPa), também na condição residual, a única geomembrana que apresentou resistência ao cisalhamento superior à da areia pura foi a GI12. No caso da maior tensão normal avaliada (300 kPa), a areia pura apresentou maior resistência ao cisalhamento em comparação a todas as demais interfaces solo-geossintético. Isso sugere que a maior eficiência da textura ocorre para baixos níveis de tensão normal.

Em relação às variações volumétricas associadas aos deslocamentos horizontais, observa-se que os efeitos de dilatação ou contração são principalmente influenciados pelo nível de tensão normal aplicada e pelo tipo ou presença da geomembrana. Para tensões normais de 37,5

kPa e 75 kPa, a areia pura apresentou maior dilatação dentre todos os ensaios, promovendo aumento do ângulo de atrito do solo. A presença das texturas inibe a expansão volumétrica do corpo de prova, refletindo em menores ângulos de atrito. Por outro lado, a presença das texturas (asperezas) favorece o desenvolvimento da adesão, que pode ser compreendida como uma coesão aparente. A adesão aumenta a resistência ao cisalhamento e não está presente na areia pura. Para tensões normais iguais a 150 kPa e 300 kPa, observa-se que algumas geomembranas produziram expansão volumétrica superior à do solo puro, como é o caso das geomembranas GT1F, GT3 e GI9. As demais geomembranas continuaram apresentando expansão volumétrica inferior à da areia pura.

É importante destacar que, conforme esperado e discutido em estudos como o de Jin et al. (2022), à medida em que se aumenta a tensão normal aplicada, ocorre uma diminuição dos valores de dilatação. Isso acontece porque o maior confinamento associado às altas tensões normais diminui a liberdade de movimentação das partículas no corpo de prova e o rearranjo volumétrico em questão.

5.4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A seguir, é apresentada uma tabela resumo (Tabela 6), considerando todos os ensaios realizados e os valores obtidos para ângulo de atrito e adesão, tanto para a condição de pico como para a condição residual. Apresentam-se também os valores de ângulo de dilatação obtidos a partir dos ensaios executados.

Tabela 6 - Tabela Resumo

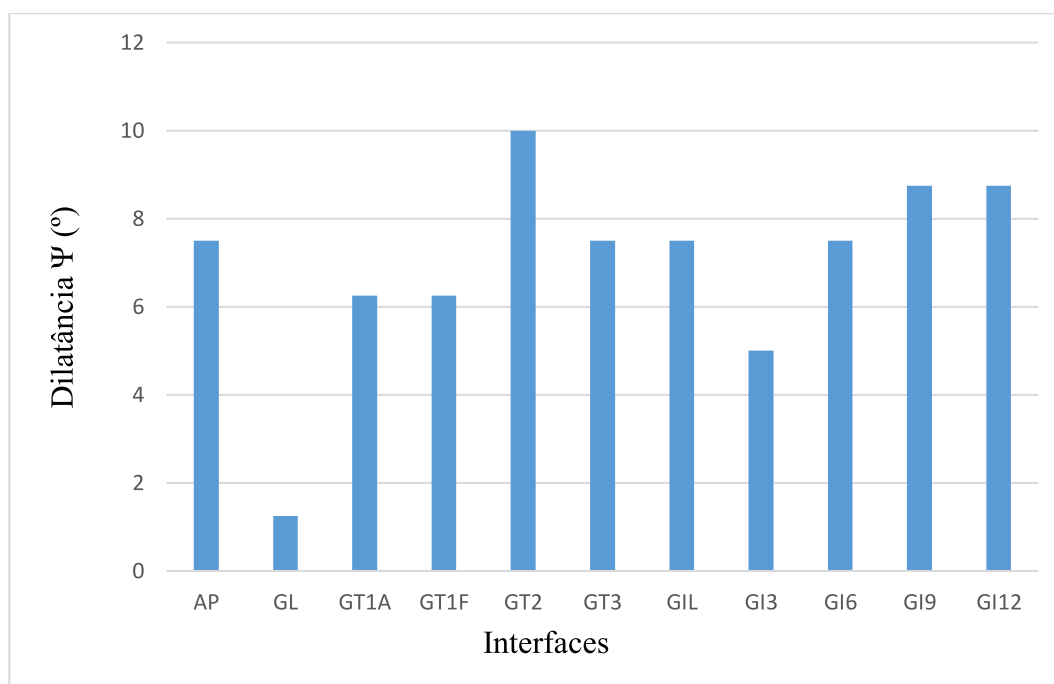
Ensaio	Pico		Residual		Ângulo de dilatação
	ϕ (°)	c/a (kPa)	ϕ (°)	c/a aparente (kPa)	Ψ (°)
AP	42	0	36	0	7,5
GL	33	0	32	0	1,25
GT1A	38	4,8	33	11,5	6,25
GT1F	40	3,8	35	6,3	6,25
GT2	40	1,3	32	14,2	10
GT3	40	4,8	34	6,1	7,5
GIL	33	0	27	0	7,5
GI3	38	9,0	34	8,5	5,0
GI6	38	6,7	32	8,2	7,5
GI9	38	11,4	31	10,5	8,75
GI12	37	16,4	30	19,8	8,75

Nota: c: coesão; a: adesão.

Cabe destacar que, com exceção das interfaces com a GI3 e GI9, todas apresentaram um aumento na adesão quando se considera a condição residual. Então, apesar de haver uma diminuição do ângulo de atrito, o aumento da adesão promove um maior engrenamento entre as partículas de areia com as texturas e, conseqüentemente, gera um ganho na resistência ao cisalhamento em comparação com a areia pura.

Na Figura 100, é possível observar o gráfico que relaciona os resultados da dilatação para cada interface estudada.

Figura 100 - Dilatância por interface



Observa-se que ocorreram variações da dilatação a depender da geomembrana utilizada, com destaque para as interfaces GT2, GI9 e GI12, que apresentaram dilatação superior ao da areia pura, representando uma maior contribuição volumétrica e maior participação do engrenamento mecânico, condições típicas da dilatação, conforme discutido anteriormente.

Além disso, cabe destacar que, para as geomembranas impressas, ocorreu um aumento da dilatação na medida em que se aumentou o número de ranhuras até a GI9 (permanecendo constante até a GI12) e, conseqüentemente, diminuiu o espaçamento entre as texturas.

A partir da Tabela 4, observa-se que os ângulos de atrito de pico e residual das geomembranas comerciais são, em geral, ligeiramente superiores aos observados para as geomembranas impressas em 3D. Por outro lado, os ângulos de dilatação das geomembranas

impressas em 3D mostraram-se maiores do que os valores encontrados para as geomembranas comerciais, com exceção de GI3.

A comparação entre as geomembranas comerciais e as impressas em relação ao parâmetro adesão revela que as geomembranas impressas forneceram, em geral, valores de adesão superiores aos proporcionados pelas geomembranas comerciais. A contribuição da parcela de adesão (a) para a resistência ao cisalhamento pode compensar os menores valores de ângulo de atrito (ϕ') encontrados nas geomembranas impressas em 3D.

É importante destacar que para atingir a condição de pico as geomembranas comerciais necessitaram de um deslocamento horizontal relativo em relação ao solo entre 0,2 mm e 0,4 mm. Por outro lado, as geomembranas impressas em 3D necessitaram de deslocamentos horizontais relativos inferiores a 0,1 mm. Portanto, esses deslocamentos são muito pequenos e dificilmente deixam de ocorrer em campo. A condição de pico provavelmente é atingida e posteriormente substituída pela condição residual pela simples operação de posicionamento do geossintético sobre o solo.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a resistência ao cisalhamento de interface de quatro tipos de geomembranas comerciais diferentes e outros cinco tipos de geomembranas impressas através de uma impressora 3D, em interação com uma areia pura. Através de ensaios de cisalhamento direto, foi possível determinar os principais parâmetros de resistência (ângulo de atrito e adesão). Foram feitos 44 ensaios e obtidas 11 envoltórias para a comparação dos resultados. Além disso, foram analisadas as dimensões de cada especificação das geomembranas, em especial, o tamanho e o espaçamento das texturas, com o intuito de formular novos *designs* de texturas para a criação de novas geomembranas em impressora 3D para uma aplicação em campo de maior resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, com maior segurança.

A partir do que foi apresentado, destacam-se as seguintes conclusões:

- As geomembranas lisas foram as que apresentaram menor desempenho na interação com a areia. Isso se deve à falta de atrito destes materiais, evidenciando a importância da textura para a resistência ao cisalhamento de interface. Para a condição de pico, as geomembranas lisas alcançaram cerca de 72% da resistência ao cisalhamento da areia pura, e para a condição residual, este valor é de 85%;
- A geomembrana lisa impressa teve um comportamento próximo ao da geomembrana lisa comercial, em termos de envoltória e ângulo de atrito, o que facilitou a comparação dos resultados, garantindo que os materiais ensaiados apresentassem propriedades semelhantes e comparáveis;
- As geomembranas texturizadas apresentaram um desempenho satisfatório. Considerando a tensão cisalhante de interface em relação à tensão cisalhante da areia pura, os resultados mostraram uma eficiência que variou entre 88% a 131%, para a condição de pico, e uma variação de 87% a 149%, para a condição residual;
- Independentemente do valor de tensão normal aplicada, as geomembranas comerciais que demonstraram maior eficiência para a condição de pico foram a GT1F (Geomembrana texturizada 01 – lado fechado) e GT3 (Geomembrana texturizada 03). Para a condição residual, as geomembranas GT1A, GT1F, GT2 e GT3 apresentaram boa resistência ao cisalhamento de interface, com desempenho acima de 90% de resistência em comparação com a areia pura em todas as tensões normais aplicadas;

- A geomembrana GI12 foi a que melhor trouxe resultados em termos de resistência ao cisalhamento de interface, tanto para a condição de pico quanto para a condição residual;
- Os resultados demonstraram que o número de asperezas e o espaçamento entre as asperezas não interferiram necessariamente no aumento do ângulo de atrito, mas colaboraram para o aumento da adesão aparente, fazendo com que melhorasse, consequentemente, a resistência ao cisalhamento de interface;
- A teoria de Coulomb indica que quanto maior a tensão normal aplicada maior é a tensão cisalhante, porém a tensão cisalhante das interfaces em relação à tensão cisalhante da areia pura apresentou uma pequena diminuição com o aumento da tensão normal;
 - Para a condição residual, observou-se uma diminuição do ângulo de atrito nas interfaces, porém houve um ganho no parâmetro de adesão aparente para quase todas as interfaces analisadas, demonstrando que, mesmo após a condição de pico, há um intertravamento das partículas do solo com as reentrâncias das geomembranas;
 - De maneira geral, as geomembranas impressas apresentaram resultados semelhantes aos das geomembranas comerciais. Porém, o diferencial foi percebido na análise residual, em que a tensão cisalhante de interface em relação à areia pura mostrou-se superior aos valores das geomembranas comerciais;
 - Como as geomembranas impressas demonstraram um melhor desempenho para as tensões normais mais baixas, e inclusive superior aos materiais comerciais já existentes, o trabalho sugere a utilização destas novas texturas de geomembranas para as camadas de cobertura de aterros sanitários, podendo ser uma solução vantajosa e eficiente.

REFERÊNCIAS

ABDULMUTTALIP, A; AKBULUT, S. Effect of fractal dimension on sand-geosynthetic interface shear strength. Powder Technology. (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117349>.

ADELEKE, Daniel et al. The Influence of Asperities and Surface Roughness on Geomembrane/Geotextile Interface Friction Angle. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering (2021). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40891-021-00265-y>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ADELEKE, D.; KALUMBA, D.; ORIOKOTE, J. Asperities effect on polypropylene & polyester geotextile-geomembrane interface shear behaviour. E3S Web of Conferences 92, 13017 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199213017>.

APARACIO-ARDILA, M; SILVA, J. Textured high-density polyethylene geomembranes in geotechnical and environmental engineering: an overview. Soils and Rocks (2026). DOI: <https://doi.org/10.28927/SR.2026.012325>.

ARAÚJO, Gregório et al. Influence of micro and macroroughness of geomembrane surfaces on soil-geomembrane and geotextile-geomembrane interface strength. Geotextiles and Geomembranes (2022). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114422000425?via%3Dihub>. Acesso em: 07 out. 2024.

ASTM D5199. Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A.

ASTM D5994. Standard Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembranes. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A. (2021).

ASTM D792. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM D1910. Standard Test Method for Flammability of Woven Textile Fabrics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.

ASTM D7466/D7466M. Standard Test Method for Measuring the Asperity Height of Textured Geomembrane. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A.

ASTM D3080-11. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (Withdrawn 2020).

ASTM D5321/D5321M. Standard test method for determining the shear strength of soil-geosynthetic and geosynthetic-geosynthetic interfaces by direct shear.

AVELAR, et al. Resistência ao Cisalhamento de Interface de Solos Residuais Tropicais e Geotêxteis em Ensaio de Cisalhamento Direto. X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2023). IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2023) Salvador, Ba, Brasil (2023).

BACAS, B. M., CAÑIZAL, J., KONIETZKY, H. Shear strength behavior of geotextile/geomembrane interfaces. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 7 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.08.001>.

BLOND, E; ELIE, G. (2006). Interface shear-strength properties of textured polyethylene geomembranes. Solmax International, Quebec, Canada.

BOLTON, M. D. **The Strength and Dilatancy of Sands**. Géotechnique, 36(1), p. 65-78. 1986.

CAMACHO, D, D. et al. Applications of additive manufacturing in the construction industry– A forward-looking review. Automation in Construction. (2018). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>.

CHEN, D. et al. Investigating the Shear Characteristics of Geomembrane–Sand Interfaces Under Freezing Conditions. Designs. (2025). DOI: <https://doi.org/10.3390/designs9010009>.

CHIARELLO, G, P. Interação de Interfaces Entre Solo e Geomembranas por Meio de Ensaio de Cisalhamento Direto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2022.

CHIU, P. e FOX, P. J. Internal and interface shear strengths of unreinforced and needlepunched geosynthetic clay liners. Geosynthetics International, 11, No. 3, 176–199. (2004).

CTG ABINT (2022). Casos de Obras. Disponível em: <https://geossinteticos.org.br/casos-de-obras>. Acesso em: 19 nov. 2025.

DIXON, N.; JONES, D. R. V.; FOWMES, G. J. Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis. Geosynthetics International. Volume: 13. Issue: 1. Page(s): 1-14. (2006).

FANG, C. et al. Determination of Residual Strength of Soils for Slope Stability Analysis: State of the Art Review. Reviews in Agricultural Science, 8: 46-57, 2020. DOI: https://dx.doi.org/10.7831/ras.8.0_46.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review. Advanced Drug Delivery Reviews, v. 107, p. 367–392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>

FENG, Y.; WANG, D. **Shear behaviors and peak friction angle predictions of three critical geomembrane–soil interfaces.** Acta Geotech. 19, 3139–3160 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02082-1>.

FLEMING, I. R. et al. Shear strength of geomembrane–soil interface under unsaturated conditions. Geotextiles and Geomembranes. (2006). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.03.009>.

FOWMES, G. J. et al. Rapid prototyping of geosynthetic interfaces: Investigation of peak strength using direct shear tests. Geotextiles and Geomembranes. (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.08.009>.

GOMES, R. M. S. (2024). Avaliação da resistência de interface entre geomembranas e outros materiais por meio de estatística, Publicação G.TD-408/2024, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180 p.

GOMES, R. M. S. et al. Estudo Estatístico Comparativo da Resistência Entre Interfaces Geossintéticas Obtidas por Meio de Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional (CDC) e Plano Inclinado (PI). XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2024), Balneário Camboriú - SC, 2024.

HASHEMINEZHAD, A. et al. *Geosynthetics for resilient geotechnics: A review of applications and innovations.* Transportation Geotechnics. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101676>.

HOSSEINI, S. M. R.; JESMANI, M. Effect of normal stress and relative compaction on secant friction angle of sands. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. (2014).

IGS BRASIL – Associação Brasileira de Geossintéticos. Casos de obras. Disponível em: <https://igsbrasil.org.br/casos-de-obras/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

IGS BRASIL – Associação Brasileira de Geossintéticos. Características requeridas para o emprego de geossintéticos – Parte 1 – Geotexteis e produtos correlatos. 2020.

IGS BRASIL – Assoc. Brasileira de Geossintéticos. webinar #8: Ensaio para Análise de Taludes com Interface - Dr. Julio Ferreira. YouTube, 4 de agosto de 2020. Disponível em: webinar #8: Ensaio para Análise de Taludes com Interface - Dr. Julio Ferreira. Acesso em: 25 jun. 2025.

JIN, J. et al. Test Studies on Geogrid–Soil Interface Behavior under Static and Dynamic Loads. Sustainability. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14074299>.

JOBI, M. A Method for Measuring Smooth Geomembrane / Soil Interface Shear Behavior Under Unsaturated Conditions. Dissertação de mestrado. University of Saskatchewan Saskatoon, SK Canada. (2005).

JUNIOR, S.L.C., ARDILA, M.A.A., PALOMINO, C.F., SILVA, J. L. Analysis of Textured Geomembrane–Soil Interface Strength to Mining Applications. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* (2023) 9:3, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00423-w>.

KHAN, R.; LATHA, G. M. Integrated Digital Image Analyses for Understanding the Particle Shape Effects on Sand–Geomembrane Interface Shear. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00499-y>.

KOERNER, R. M., 2012, *Designing with geosynthetics*, volumes 1 e 2, 6ª edição, Xlibris.

KOERNER, R. M.; SOONG, T. Y. Stability Assessment of Ten Large Landfill Failures. *Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics*. (2000). DOI: [https://doi.org/10.1061/40515\(291\)1](https://doi.org/10.1061/40515(291)1).

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1969.

LOPES, M. G; BARROSO, M. NEVES. J. Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obra. (2021).

LOPES, H. R.; SILVA, J. L. Influência da Textura de Geomembranas na Resistência de Interface com Solo Argiloso. XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2024), Balneário Camboriú - SC, 2024.

MARKOU, I. N.; EVANGELOU, E. D. **Shear Resistance Characteristics of Soil–Geomembrane Interfaces**. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 4, art. 29, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-018-0146-6>.

MITCHEL, J. K.; SOGA, K. *Fundamentals of Soil Behavior*. 3ª. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2005.

MIURA, S., TOKI, S. A. Sample Preparation Method and Its Effects on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand. *Soils and Foundations*, 22(1), p. 61-77. 1982.

MONTEIRO, C. B. Estudo de interface solo – geomembrana com variações de níveis de saturação do solo. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2012.

MULUTI, S. S. et al. Shear Strength of Single and Multi-layer Soil–Geosynthetic and Geosynthetic–Geosynthetic Interfaces Using Large Direct Shear Testing. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00450-1>.

NORTENE. Manual de Geossintéticos 4a Edição Grupo Nortène. (2016). Disponível em: silo.tips_manual-de-geossinteticos-grupo-nortene.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

OLIVEIRA FILHO, W. L. **Considerações sobre Ensaio Triaxiais em Areias**. Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de

Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, p. 285. 1987.

PALMEIRA, E. M. Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Edição 2018. São Paulo. Oficina de Textos, 2018, 294 p.

PENASSO, S, M. **Estudo experimental, numérico e analítico de colunas granulares encamisadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2022.

PINTO, C. S. Livro - Curso Básico de Mecânica dos Solos, 3º Edição, Editora Oficina de Textos. (2006).

PUNETHA, P.; MOHANTY, P.; SAMANTA, M. Microstructural investigation on mechanical behavior of soilgeosynthetic interface in direct shear test. Geotextiles and Geomembranes. (2017). DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.02.001>.

RACHED, Ahmed, S; SOROUR, Tamer, M; ELSAYED, Ahmed, N. Study of the Effect of Geomembranes on the Interaction between the Soil and Underground Structures. Journal of Engineering Research (2022). DOI: https://www.researchgate.net/publication/366118152_Study_of_the_Effect_of_Geomembranes_on_the_Interaction_between_the_Soil_and_Underground_Structures.

RIBEIRO, E. F.; RICCIO, M. V. F. **Construção de um Pluviador de Areia para Moldagem de Corpos de Prova com Diferentes Densidades e Índices de Vazios**. VI Congresso de Engenharia Civil - "Engenharia e Sustentabilidade: Caminhos para o Futuro". Juiz de Fora, p. 11. 2019.

RICCIO, M. V. F. **Estudo Experimental da Interação Solo-Reforço Incluindo a Simulação da Compactação**. Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro. 2001.

RODRIGUES, L, F, N. **Estudo do Cisalhamento em Colunas Granulares Encamisadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2020.

ROWE, R.K.; FAN, J. The Application of Geosynthetics in Tailings Storage Facilities: A General Review. Mining 2024, 4, 447–468. <https://doi.org/10.3390/mining 4020026>.

ROWE, P. W. **The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact**. Proceedings of the Royal Society. Londres: Verlag nicht ermittelbar. p. 500-527, 1962.

SÁNCHEZ, N. P. Estudo de alguns aspectos que influenciam a aderência entre geossintéticos e diferentes materiais. 2018. xxii, 168 f., il. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SANCHEZ, Nelson. P. et al. Influência da Altura da Textura na Resistência ao Cisalhamento de Interfaces entre Areia e Geomembrana. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e Desenvolvimento Urbano (COBRAMSEG 2018), Salvador - BA, 2018.

SILVA, José. W. D. et al. Resistência ao cisalhamento de interface em sistemas de barreiras impermeáveis com geomembranas reforçadas. IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019), São Carlos - SP, 2019.

SOLTZ, G. et al. Determination of geomembrane – protective geotextile friction angle: An insight into the shear rate effect. (2020). Geotextiles and Geomembranes. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.11.007>.

SOBRAN, B. M. K. Livro - Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 8ª Edição. Cengage Learning. (2014).

TANGA, A. T. et al. Machine Learning for soil-geosynthetic interface shear strength analysis. (2023). 12 International Conference on Geosynthetics, v. (1): 705-710.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of Soil Mechanics**. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons. 1948.

VANGLA, Prashanth e GALI, Madhavi, Latha. Shear behavior of sand-smooth geomembrane interfaces through micro-topographical analysis. Geotextiles and Geomembranes. (2016). DOI: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114416300292?via%3Dihub>.

VIDAL, D. M.; SCHIAVON, J. A. Controle de Qualidade de Geossintéticos no Brasil. IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2023). Salvador – BA, 2023.

WOOD, D. M. *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, **2014**.

XIAO, S.; DAMIANS, I. P.; HU, W. *A Review of the Soil–Geosynthetic Interface Direct Shear Test and Numerical Modelling*. *Buildings*, v. 16, n. 1, p. 43, 2025. DOI: [10.3390/buildings16010043](https://doi.org/10.3390/buildings16010043).

XU, G.; SHI, J.; LI, Y. Change pattern of geomembrane surface roughness for geotextile/textured geomembrane interfaces. Geotextiles and Geomembranes. (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.09.009>.

XU, G. et al. Angle-based residual strength estimation of geotextile/textured geomembrane interface. *Geosynthetics International*. (2025). DOI: <https://doi.org.ez25.periodicos.capes.gov.br/10.1680/jgein.24.00115>.

ZIDAN, P. M.; KEMNITZ, M.; RITTER, E. *Locating leaks in geomembrane-lined ponds using the electrical leak location method: Case histories*. Geotextiles and Geomembranes, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.04.003>.